



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

# **MODULAARINEN TOIMILAITE MOBIILIROBOTTIIN**

Jesse Mattila

Ohjaaja(t): A. Tikanmäki & T. Liedes

KONETEKNIIKAN TUTKINTO-OHJELMA

Diplomityö 2021

# TIIVISTELMÄ

Modulaarinen toimilaite mobiilirobottiin

Jesse Mattila

Oulun yliopisto, Konetekniikan tutkinto-ohjelma

Diplomityö 2021, 86 s.

Työn ohjaaja(t) yliopistolla: DI Antti Tikanmäki ja yliopistonlehtori, TkT Toni Liedes

Tämän diplomityön aiheena on suunnitella ja valmistaa mobiilirobottiin soveltuva toimilaite, jota voidaan käyttää Oulun yliopiston Biomimetiikka ja älykkäät järjestelmät - tutkimusyksikön robottiprojekteissa ja ensisijaisesti suunnitteilla olevassa robottikädessä. Toimilaite suunnitellaan sopivaksi robottikäteen, joka voi korvata tutkimusyksikön mobiilirobotissa käytettävän Jaco-robottikäden. Toimilaitteen suorituskyky ja kiinnitysmahdollisuudet suunnitellaan siten, että sitä voidaan käyttää ensisijaisesti robottikäsivarren kolmessa ensimmäisessä nivelessä.

Työn teoriaosassa käydään läpi yleisesti mobiilirobotteja ja käsivarsirobotteja, sekä niissä käytettyjä toimilaitetyyppejä. Teoriaosuudessa käydään läpi myös erilaisia vaihdetyyppejä ja vaihteiden valmistuksen kannalta tärkeitä asioita. Lopuksi työn teoriaosuudessa käydään läpi työn kannalta tärkeitä materiaaleja ja yleisimpiä valmistusmenetelmiä. Käytännön osassa suunnitellaan ja valmistetaan modulaarinen toimilaite. Toimilaitteen sykloidinen vaihde valmistetaan kolmesta eri materiaalista ja lopuksi eri vaihteilla varustettuja toimilaitteita testataan dynamometrilla. Suunniteltuja toimilaitteita hyödyntävästä robottikäsivarresta esitellään myös mahdollinen kokoonpano.

Työn tuloksena syntyy modulaarinen toimilaite ja siihen kolmesta eri materiaalista sykloidiset vaihteet. Toimilaite testataan dynamometrilla eri vaihteita käyttäen ja sykloidisten vaihteiden hyötysuhteista muodostetaan kuvaajat.

*Asiasanat: robotiikka, vaihde, toimilaite*

# ABSTRACT

Modular actuator for mobile robot

Jesse Mattila

University of Oulu, Degree Programme of Mechanical Engineering

Master's thesis 2021, 86 pp.

Supervisor(s) at the university: M.Sc. (Tech.) Antti Tikanmäki and University Lecturer, D.Sc. (Tech.) Toni Liedes

The aim of this Master's thesis is to design and manufacture an actuator that is suitable for a mobile robot and which can be used in the future robot projects of Biomimetics and Intelligent Systems research unit and primarily in the planned robotic arm. The actuator is designed to fit a robotic arm that could replace the Jaco robotic arm that is currently used in the research unit's mobile robot. The performance and attachment capabilities of the actuator are designed so that it can be used primarily for the first three joints of the robotic arm.

The theoretical part of the thesis deals with mobile robots and robotic arms in general, as well as the types of actuators commonly used in them. The theoretical part also covers different types of gears and important issues for the manufacture of gears. Finally, the theoretical part of the thesis reviews some materials and the most common manufacturing methods that are important for the thesis. In the practical part, a modular actuator is designed and manufactured. Cycloidal drive used in the actuator is manufactured of three different materials and in the end actuator is tested with the different cycloidal drives using a dynamometer. A possible configuration of a robotic arm made using the actuators is also presented.

As the result of the thesis, an actuator and cycloidal drives made of three different materials were manufactured. The actuator was tested with the different cycloidal drives using the dynamometer and efficiencies of the cycloidal drives were plotted.

*Keywords: robotics, transmission, actuator*

# ALKUSANAT

Diplomityö tehtiin Oulun yliopiston Biomimetiikka ja älykkäät järjestelmät – tutkimusyksikössä (BISG). Diplomityön aihe ehti työn tekemisen aikana vaihtua pari kertaa, mutta lopullisen aiheen diplomityö tehtiin syyskuun 2019 ja marraskuun 2021 välisenä aikana.

Haluan kiittää professori Juha Röningiä mahdollisuudesta tämän diplomityön tekemiseen ja ohjaajaani Antti Tikanmäkeä diplomityön aiheesta, ideoista ja ohjauksesta tämän diplomityön toteutuksessa. Haluan kiittää myös ohjaajaani Toni Liedestä, jonka kautta sain tietää tästä diplomityömahdollisuudesta ja joka ohjasi diplomityön toteutuksessa. Lisäksi haluan kiittää muita BISG-tutkimusyksikön jäseniä saamastani avusta diplomityön aikana. Kiitokset myös Fab Labille ja Oulun yliopiston konepajalle, joiden henkilökunta ja laitteisto mahdollisti työssä tarvittujen osien valmistuksen.

Lopuksi haluaisin kiittää avopuolisoani Katjaa, ystäviäni ja perhettäni, jotka ovat tukeneet minua opintojeni ja varsinkin diplomityön suorituksen aikana.

Oulu, 16.11.2021

*Jesse Mattila*  
Jesse Mattila

# SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ALKUSANAT

SISÄLLYSLUETTELO

MERKINNÄT JA LYHENTEET

1 JOHDANTO .....	7
2 MOBIILIROBOTIT .....	9
2.1 Mobiilirobotteihin soveltuvat käsivarret .....	9
2.2 Mekatroniikan toimilaitteet .....	10
2.2.1 Sähkömagneettiset toimilaitteet .....	12
2.2.2 Hydrauliset toimilaitteet .....	14
2.2.3 Pneumaattiset toimilaitteet .....	14
3 VAIHTEET .....	16
3.1 Vaihteiden tärkeitä ominaisuuksia .....	17
3.2 Vaihdeyyt .....	18
3.2.1 Planeettavaihde .....	18
3.2.2 Syklodinen vaihde .....	21
3.2.3 Harmoninen vaihde .....	25
3.3 Vaihteiden suunnittelu .....	27
3.4 Vaihteiden häiriötilanteet ja vikaantuminen .....	28
3.5 Vaihteiden jähdytys ja voitelu .....	28
4 VALMISTUSMENETELMÄT JA MATERIAALIT .....	31
4.1 Valmistusmenetelmät .....	31
4.1.1 Jyrsintä .....	31
4.1.2 Valaminen .....	32
4.1.3 Vesileikkaus .....	32
4.1.4 3D-tulostus .....	33
4.1.5 Laserleikkaus .....	33
4.2 Materiaalit .....	34
4.2.1 Polyoxymetyyleeni (POM) .....	34
4.2.2 Akryyli (PMMA) .....	35
4.2.3 Alumiini .....	35
5 MODULAARINEN NIVEL .....	37

5.1 Nivelen vaatimukset.....	37
5.1.1 Suorituskyky .....	37
5.1.2 Paino ja dimensiot.....	40
5.2 Toimilaitevalinta .....	41
5.2.1 Toimilaitetyypin valinta.....	41
5.2.2 Sähkömoottorin valinta.....	42
5.2.3 Alennusvaihde .....	44
5.3 Itse valmistettava alennusvaihde.....	46
5.3.1 Alennusvaihteen materiaalivalinnat ja valmistusmenetelmät.....	46
5.3.2 Alennusvaihteen 3D-mallinnus .....	48
5.3.3 Akryylista valmistettu sykloidinen vaihde .....	55
5.3.4 Alumiinista valmistettu sykloidinen vaihde .....	56
5.3.5 POM:sta valmistettu sykloidinen vaihde .....	57
5.4 Toimilaitteen anturointi.....	58
5.5 Nivelen koteloointi ja kokoonpano .....	60
5.6 Nivelistä valmistettava robottikäsi.....	65
6 NIVELLEN JA VAIHTEIDEN TESTAUS .....	67
6.1 Moottorin testaus.....	67
6.2 Akryylisen vaihteen testaus.....	69
6.3 Alumiinisen vaihteen testaus.....	71
6.4 POM-vaihteen testaus .....	72
6.5 Vaihteiden hyötysuhteet.....	74
7 TULOSTEN TARKASTELU .....	77
8 YHTEENVETO .....	79
9 LÄHDELUETTELO.....	81

## MERKINNÄT JA LYHENTEET

AC	Alternating Current
BISG	Biomimetics and Intelligent Systems Group
BLDC	Brushless Direct Current
CNC	Computerized Numerical Control
DC	Direct Current
DD	Direct Drive
FET	Field Effect Transistor
PLA	Polylaktidi
PMDC	Permanent Magnet Direct Current
PMMA	Polymetyylimetakrylaatti
POM	Polyoxymetyneeni
SEA	Series Elastic Actuator
VSA	Variable Stiffness Actuator
i	välityssuhde
n	pyörimisnopeus
$\omega$	kulmanopeus

# 1 JOHDANTO

Tarve roboteille, jotka pystyvät tekemään tuotantolinjoilla ihmisille kuuluvia tehtäviä, on ollut viime aikoina kasvussa. Tämä johtuu pääasiassa siitä, että robotit pystyvät imitoimaan hyvin ihmisen toimintaa ja ne pystyvät työskentelemään ihmiselle vaarallisissa olosuhteissa. Tämän tarpeen vuoksi useat robotiikan tutkimukset kohdistuvat mobiilirobottien kehittyneeseen ohjaukseen ja toimilaitteisiin, joilla voidaan suorittaa normaalisti ihmisille kuuluvia tehtäviä. (Jhang, L. et al, 2017, s. 1)

Robottien lisääntyessä on kasvanut tarve suuren välityssuhteen, suuren vääntömomentin ja pienen välyksen omaaville toimilaitteille. Tällä hetkellä harmoniset vaihteet ovat yleisin valinta, kun suuri välityssuhde ja pieni koko ovat toimilaitteelta haluttuja ominaisuuksia. Kaupallisesti harmonisia vaihteita löytyy kuitenkin rajoitetuilla välityssuhdevaihtoehtoilla ja niiden massa kasvaa huomattavasti, kun tarvitaan suurta vääntömomenttia. Syklodiset vaihteet tarjoavat hyvän vaihtoehdon harmonisille vaihteille, sillä ne tarjoavat suuren välityssuhteen pienessä paketissa ja suuremmalla vääntömomentilla. (Farrell, L. et al, 2018, s. 1)

Tässä diplomityössä on tavoitteena valmistaa modulaarinen toimilaite, jota voidaan käyttää ensisijaisesti mobiilirobotin päälle asennettavassa robottikäsivarressa. Robottikäsivarteen suunnitellaan pyörivä toimilaite, jonka dimensiot pyritään pitämään pienenä. Toimilaitteesta halutaan mobiilirobottia ajatellen mahdollisimman kevyt ja siinä tulee olla useita eri kiinnitysmahdollisuuksia. Tavoitteena on myös mahdollisimman hyvä tehon ja painon suhde.

Modulaarisen toimilaitteen suunnittelua varten työssä tehdään katsaus markkinoilta löytyviin modulaarisiin niveliin, sähkömoottoreihin ja pienikokoisiin alennusvaihteisiin, joita olisi mahdollista käyttää käsivarsirobotissa. Työn merkittävänä osana on syklodisen vaihteen suunnittelu ja valmistus. Valmistusmateriaaleina käytetään pääosin akryyliä, POM:ia ja alumiinia. Materiaalivalinnoilla pyritään saamaan vaihteen paino mahdollisimman alhaiseksi. Osien valmistuksessa hyödynnetään Oulun yliopistolla käytössä olevia valmistusmenelmiä, kuten 3D-tulostusta, laserleikkausta ja CNC-koneistusta. Syklodisen vaihteen suunnittelussa hyödynnetään paljon 3D-tulostusta ja laserleikkausta, koska ne ovat halpoja valmistusmenetelmiä ja suhteellisen nopeita.



Sykloidisia vaihteita valmistetaan eri materiaaleista ja niiden testaukseen käytetään dynamometriä.

Työn odotetaan kehittävän tietämystä toimilaitteiden ja varsinkin sykloidisen vaihteen valmistuksesta, jotta niiden avulla voitaisiin jatkossa valmistaa toimilaitteita suhteellisen nopeasti. Vaihteiden valmistaminen itse mahdollistaa vaihteen koon ja välityssuhteen muokkauksen käyttökohteeseen sopivaksi, eikä tutkimuskäytössä itse valmistetun vaihteen mahdollisesti rajoittunut elinikä aiheuta suuria ongelmia.

Työn teoriaosassa käydään aluksi läpi tiiviisti mobiilirobotteja, robottikäsivarsia ja niissä käytettäviä toimilaitetyyppejä. Tämän jälkeen käsitellään erilaisia vaihteita ja niiden suunnittelua. Lopuksi työn teoriaosassa käydään läpi eri materiaaleja ja valmistusmenetelmiä.

Työn käytännön osa alkaa toimilaitteen vaatimusten määrittelyllä Jaco-robotin ominaisuuksien pohjalta, ja katsauksella robottikäsivarren kannalta oleellisiin markkinoilta löytyviin modulaarisiin niveliin. Tämän jälkeen työssä siirrytään toimilaitetyypin valintaan ja sähkömoottorin valintaan markkinoilta löytyvistä vaihtoehtoista. Seuraavaksi työssä käydään läpi markkinoilta löytyviä alennusvaihteita ja asetetaan alkuehdot itse valmistettavalle vaihteelle. Tämän jälkeen käsitellään vaihdetta koskevat materiaalivalinnat ja valmistusmenetelmät, ja esitellään testausta varten valmistetut sykloidiset vaihteet. Seuraavaksi käydään läpi modulaarisen toimilaitteen anturoidi ja kotelointi, ja esitellään yksi vaihtoehto toimilaitteista rakennettavalle robottikäsivarrelle. Lopuksi valmistetut sykloidiset vaihteet testataan ja työn tuloksia tarkastellaan.

## 2 MOBIILIROBOTIT

Mobiilirobotti on yksi teollisuusroboteista, joka pystyy liikkumaan tehokkaasti useissa eri ympäristöissä ja maastoissa. Jotkin mobiilirobotit pystyvät myöskin automaattiseen navigointiin ja sisätilapaikoitukseen käyttämällä anturipohjaisia ohjausjärjestelmiä. (Jhang, L. et al, 2017, s. 1)

Renkaiden käyttäminen robotin liikkeen aikaansaamiseksi on hyvin yleistä. Tämä johtuu siitä, että tavallisesti renkailla liikkuminen kuluttaa vähemmän energiaa ja niillä saavutetaan suurempi nopeus, kuin teloilla tai jaloilla liikkuvilla mobiiliroboteilla. Ohjauksen kannalta renkaalliset mobiilirobotit ovat myös helpompia niiden yksinkertaisen mekaniikan ansiosta. Renkaalliset robotit sopivat moniin erilaisiin käyttökohteisiin, mutta niiden heikkoudeksi osoittautuu epätasainen ja karkea maasto. (Siciliano, B. & Khatib, O., 2008, s. 392)

Lähes 50% maapallon maa-alueesta on renkailla ja teloilla liikkuvien koneiden ulottumattomissa. Ihmiset ja eläimet pystyvät kuitenkin liikkumaan suurimmassa osassa näistäkin alueista, joten niistä on lähdetty hakemaan inspiraatiota robottien suunnitteluun. Erityisesti jalalliset robotit tarjoavat hyvän vaihtoehdon vaikeakulkuisiin ympäristöihin, jotka ovat ihmisille vaarallisia. (Kalouche, S., 2016, s. 4110)

### 2.1 Mobiilirobotteihin soveltuvat käsivarret

Yleisesti tunnettujen teollisuusrobottien ominaisuuksia ovat huomattavan hyvä paikoitustarkkuus, suuret liikenopeudet, kestävyys, jyrkkyys, sekä suhteellisen halpa hinta. Teollisuusrobotteja käytetään tavallisesti tarkasti rakennetuissa ympäristöissä, joissa käsiteltävien kappaleiden paikka ja muoto on tarkasti määritetty, ja joissa ympäristöön ja ihmisiin törmäämiset voidaan ennalta ehkäistä. Yleisesti hyvä paikoitustarkkuus vaatii suurta jäykkyyttä, jonka haittapuolena on robotin painon nouseminen hyötykuormaan verrattuna. (Albu-Schäffer, A. et al, 2007, s. 2)

Vastakohtana ovat sovellukset, joissa työskennellään ihmisten läheisyydessä ennalta määrittämättömissä jokapäiväisissä tilanteissa. Näissä käyttötarkoituksissa robotin suurta absoluuttista paikoitustarkkuutta ei voida hyödyntää ympäristön rajoitetun

paikoitustarkkuuden vuoksi, joten paikoitustarkkuuden rakenteelliset sivuvaikutukset, kuten suuri jäykkyys ja massa, eivät ole toivottuja. (Albu-Schäeffe, A. et al, 2007, s. 2)

Tällaisia käyttökohteita ovat:

- kokoamisprosessit, joissa koottavien osien ja/tai robotin paikoitustarkkuus on huomattavasti pienempi, kuin kokoamistoleranssi
- käyttökohteet, joissa robotti työskentelee ihmisten läheisyydessä tai suorassa fyysisessä yhteistyössä
- liikkuvat palvelurobotit, joissa robotin ja ympäröivien kohteiden paikoituksessa ja ympäröivien kohteiden muodossa on paljon epävarmuutta. (Albu-Schäeffe, A. et al, 2007, s. 2)

Edellä mainitut käyttökohteet vaativat robotin mekaaniselta rakenteelta pientä massaa hyötykuormaan verrattuna, jotta robotin liikkuvuus parantuisi ja vahinkojen todennäköisyys pienenesi. Näihin käyttötarkoituksiin suunniteltuja robotteja käytetään kuitenkin suhteellisen pienillä nopeuksilla teollisuusrobotteihin verrattuna, mikä mahdollistaa suuremman välityssuhteen vaihteiden käyttämisen. Tähän käyttötarkoitukseen suunniteltujen robottikäsivarsien tärkeimpiin ominaisuuksiin kuuluu liikkuvien osien alhainen hitausmomentti ja hyvä takaisinajettavuus. (Siciliano, B. & Khatib, O., 2008, s. 1339; Albu-Schäeffe, A. et al, 2007, s. 2)

## 2.2 Mekatroniikan toimilaitteet

Mekatroniikka käsittelee mekaniikan, elektroniikan, ohjauksen ja tietokonetekniikan yhdessä soveltamista elektromekaanisten tuotteiden ja järjestelmien kehityksessä kokonaissuunnittelun näkökulmasta. Mekatroniikan eri osa-alueet näkyvät kuvassa 1. Mekatronisessa järjestelmässä digitaalisia ohjaustekniikoita käytetään elektroniikan ja sähkötekniikan avulla mekaniikan ongelmien ratkaisemiseen. Tavallinen mekatroninen järjestelmä koostuu mekaanisesta rungosta, toimilaitteista, antureista, ohjaimista, signaalin muokkauksen laitteista, tietokoneesta, ohjelmista, käyttöliittymästä ja virtalähteestä. (de Silva, C.W, 2015, s. 7; Bolton, W., 1995, s. 1; Bolton, W., 1995, s. 15)



**Kuva 1.** Mekatroniikan osa-alueet (mukaillen Mynderse, J. & Shelton, J., 2015, s. 3).

Esimerkki mekatronisesta järjestelmästä on servomoottori, jota käytetään paljon robottien toimilaitteena. Servomoottorin anturoidulla takaisinkytkennällä mahdollistetaan monimutkaisten liikkeiden tarkka toteutus. Servomoottorissa yhdistyy mekatroniikan osa-alueista mekaniikka, sähkötekniikka ja elektroniikka. Servomoottorin mekaanisia komponentteja ovat roottori, staattori, laakerit ja moottorin kotelointi. Sähkötekniisiä komponentteja ovat moottorin johdotus, jolla mahdollistetaan magneettikentän luominen ja virran syöttö. Servomoottorin elektronisiin komponentteihin kuuluu anturointi. (de Silva, C.W, 2015, s. 7)

Fyysiset rakenteet kuten palkit, nivelet, kelkat, laakerit ja akselit muodostavat robotin liikuteltavan rungon, eli robotin mekanismin. Toimilaitteet muuttavat ohjaussignaalin mukaisesti tehon robotin rungon liikkeeksi. Jokainen robotti koostuu joukosta robotin runkoon kiinnitettyjä toimilaitteita, jotka muodostavat robotin voimansiirtojärjestelmän. (Siciliano, B. & Khatib, O., 2016, s. 68; Jazar, R.N., 2010, s. 13; Morecki, A., Knapczyk, J., 2014, s. 223; Bolton, W., 1995, s. 86)

Joustavien toimilaitteiden ja alennusvaihteiden käyttö on yleistynyt pehmeässä robotiikassa, jossa robotit on suunniteltu työskentelemään ihmisten kanssa. Tällaisia toimilaitetyyppejä ovat sarjassa joustava toimilaite (SEA) ja jäykkyydeltään muuttuva toimilaite (VSA). Näissä tapauksissa toimilaite on suunniteltu mekaanisesti alistuvaksi, joka vähentää mahdollisissa törmäyksissä ihmiseen kohdistuvan kineettisen energian määrää. Tällainen turvallisuuteen keskittyvä suunnittelu heikentää kuitenkin aina robotin tarkkuutta ja nopeutta. (Siciliano, B. & Khatib, O., 2016, s. 244)

Useimmat robottien toimilaitteet ovat markkinoilta löytyviä tuotteita, joita muokataan tarvittaessa käyttötarkoitukseen sopivaksi. Tällä hetkellä roboteissa käytetään pääasiassa pneumaattisia, hydraulisia ja sähkömagneettisia toimilaitteita, ja näiden erilaisia yhdistelmiä. (Jazar, R.N., 2010, s. 13; Morecki, A., Knapczyk, J., 2014, s. 223; Siciliano, B. & Khatib, O., 2016, s. 78)

### **2.2.1 Sähkömagneettiset toimilaitteet**

Yleisin roboteissa käytetty toimilaitetyyppi on sähkömagneettiset toimilaitteet ja niitä käyttää arviolta yli 50 % roboteista. Ne ovat hydraulisiin ja pneumaattisiin toimilaitteisiin verrattuna puhtaampia, hiljaisempia ja tarkempia. Sähkömagneettisten toimilaitteiden etuihin kuuluvat tehonlähteen yksinkertaisuus, sähkömoottoreiden saatavuus käyttövalmiina, tarkkuus, helppo ohjattavuus, pienet tehohäviöt ja vähäiset saasteet. (Jazar, R.N., 2010, s. 13; Siciliano, B. & Khatib, O., 2016, s. 78; Morecki, A., Knapczyk, J., 2014, s. 250)

Useimmat robottikäsivarret käyttävät servomoottoreita voimanlähteenään. Ne muistuttavat rakenteeltaan paljon perinteisiä sähkömoottoreita, mutta niillä on pienempi hitausmomentti ja suurempi vääntö suurien kiihtyvyyksien varalta. Tyypilliset servomoottorit robotiikassa ovat joko kestmagneettisia DC-moottoreita (PMDC) tai harjattomia DC-moottoreita (BLDC). (Siciliano, B. & Khatib, O., 2016, s. 78-79)

Kestomagneettisia DC-moottoreita käytetään paljon niiden suuren vääntömomentin, laajan nopeudenhallinta-alueen, hyvien vääntömomentti-nopeus-ominaisuuksien ja useisiin ohjaustapoihin soveltuvuuden vuoksi. (Siciliano, B. & Khatib, O., 2016, s. 79)

Usein AC-servoiksi kutsutut harjattomat DC-moottorit ovat laajalti käytössä teollisuusroboteissa. Harjattomilla moottoreilla on tavallisesti hyvä suorituskyky-hinta-

suhde niiden yksinkertaisemman rakenteen vuoksi. Harjattomien moottoreiden ohjaus on kuitenkin monimutkaisempi ja kalliimpi kuin harjallisten DC-moottoreiden. (Siciliano, B. & Khatib, O., 2016, s. 79)

Pienet yksinkertaisemmat robotit käyttävät usein askel- tai pulssimoottoreita. Nämä robotit käyttävät usein avoimen piirin paikoituksen ja nopeuden ohjausta. Askel- ja pulssimoottorit ovat suhteellisen halpoja, ja ne ovat usein helposti kytkettävissä sähköiseen ohjauspiiriin. (Siciliano, B. & Khatib, O., 2016, s. 80)

Suurin sähkömagneettisten toimilaitteiden haitta on tehon puute. Sähkömagneettisissa toimilaitteissa tehon suhde toimilaitteen painoon on huonompi kuin hydraulisissa toimilaitteissa. Tämä johtuu sähkömagneettiseen toimilaitteeseen tarvittavien komponenttien painosta. (Morecki, A., Knapczyk, J., 2014, s. 250)

Sähkömoottoreilla on suurin hyötysuhde suurilla pyörimisnopeuksilla, joten suuren välityssuhteen vaihteita käytetään usein pyörimisnopeuden alentamiseen käyttökohteeseen sopivaksi. Suuren välityssuhteen vaihteilla on tavallisesti huono takaisinajettavuus, jonka ansiosta vaihde voi toimia myös jarruna. Huono takaisinajettavuus aiheuttaa kuitenkin ongelmia törmäystilanteissa. Vaihde on sähkömagneettisten toimilaitteiden tärkein lisäkomponentti, joka vaikuttaa toimilaitteen ohjauksen kaistanleveyteen ja kykyyn selvitä törmäyksistä ympäristön kanssa. (Jazar, R.N., 2010, s. 13; Wensing, P.M. et al, 2017, s. 509)

Wensing et al esittelivät työssään kolme tavallista robotiikkaa varten suunniteltua sähkömagneettisten toimilaitteiden konseptia:

- suuren välityssuhteen vaihdemoottori momenttianturilla varustettuna
- rakenteeltaan sarjassa joustava toimilaite (SEA)
- voimahallittu proprioceptive-toimilaite, jossa käytetään pienen välityssuhteen vaihdetta. (Wensing, P.M. et al, 2017, s. 510)

Näiden kolmen konseptin lisäksi robotiikassa on yleisessä käytössä myös suoraveto (DD) toimilaite. Suoraveto toimilaite ei käytä alennusvaihdetta moottorin tehollisen vääntömomentin tuottamisessa, mikä eroaa tavallisista sähkömagneettisten toimilaitteiden lähestymistavoista. (Kenneally, G. et al, 2016, s. 900)

### 2.2.2 Hydrauliset toimilaitteet

Sähkömagneettisten toimilaitteiden yleistymisestä huolimatta hydrauliset toimilaitteet ovat edelleen yksi käytetyimpiä toimilaitetyyppejä. Hydrauliset toimilaitteet ovat hyviä niiden suurien nopeuksien ja teho-massa-suhteiden vuoksi. Tämän vuoksi hydraulisia toimilaitteita käytetään pääasiassa suuria massoja nostelevissa roboteissa. Hydraulisten toimilaitteiden mekaaninen liike voi olla lineaarista liikettä, kuten sylintereillä, tai pyörimisliikettä, kuten hydraulisilla moottoreilla. (Jazar, R.N., 2010, s. 13; Morecki, A., Knapczyk, J., 2014, s. 235; Siciliano, B. & Khatib, O., 2016, s. 80-81)

Hydrauliikan huonoihin puoliin kuuluvat kuitenkin kovat äänet, taipumus vuotamiseen ja käyttöön tarvittava laitteisto. Hydrauliset voimanlähteet ovat kookkaita ja nopealiikkeiset servoventtiilit ovat usein kalliita. Vuodot ja huolto-ongelmat ovat myös rajoittaneet hydraulisten toimilaitteiden käyttöä roboteissa. Hydraulisia toimilaitteita on kuitenkin yritetty käyttää paljon, koska niillä pystytään tuottamaan sähkömagneettisia toimilaitteita suurempi voima ja vääntömomentti. (Siciliano, B. & Khatib, O., 2016, s. 80-81; Jazar, R.N., 2010, s. 13)

### 2.2.3 Pneumaattiset toimilaitteet

Pneumaattisilla toimilaitteilla on paljon yhteistä hydraulisten toimilaitteiden kanssa. Pneumaattisia toimilaitteita käytetään tavallisesti yksinkertaisissa manipulaattoreissa, joissa ne liikkuvat mekaanisesta rajasta toiseen. Pneumaattisia toimilaitteita käytetään usein pienissä ja yksinkertaisissa roboteissa poimintatehtäviin. (Siciliano, B. & Khatib, O., 2016, s. 81; Morecki, A. & Knapczyk, J., 2014, s. 223-224)

Pneumaattisten toimilaitteiden käyttö roboteissa on suhteellisen halpaa ja helppoa, mutta niitä ei kuitenkaan pystytä ohjaamaan tarkasti. Liikkeiden heikon tarkkuuden lisäksi pneumaattisia toimilaitteita ei käytetä suuria voimia vaativissa sovelluksissa, koska ne tuottavat hydraulisiin ja sähkömagneettisiin toimilaitteisiin verrattuna pienen voiman tai vääntömomentin. (Jazar, R.N., 2010, s. 13; Siciliano, B. & Khatib, O., 2016, s. 81)

Pneumaattisten toimilaitteiden etuna on se, että käyttöön tarvittavaa ilmaa on reilusti saatavilla ja se voidaan vapauttaa ympäristöön tehtävän suorituksen jälkeen. Pneumaattisten toimilaitteiden pienempi käyttöpaine tekee niistä myös hydraulisiin toimilaitteisiin verrattuna turvallisempia. Lisäksi ilmalla on nesteisiin verrattuna hyvät dynaamiset ominaisuudet. (Morecki, A. & Knapczyk, J., 2014, s. 223-224)

Pneumaattiset toimilaitteet voidaan jakaa lineaarisiin toimilaitteisiin ja kiertokulmaa ajaviin toimilaitteisiin. Lineaarisissa ja kiertokulmaa ajavissa toimilaitteissa on kummassakin mäntä, jota ohjataan paineilmalla. Kiertokulma on toteutettu männässä olevalla hammastuksella, joka männän liikkeen aikana kääntää toisioakselin hammaspyörää. Tavallisesti ohjattavalla männällä on vain kaksi asentoa ja ohjaussignaalia ohjataan kumpaan asentoon mäntä ajetaan. (Morecki, A., Knapczyk, J., 2014, s. 224-227)



### 3 VAIHTEET

Vaihteiden ensisijaisena tehtävänä on käyttävän koneen, kuten sähkömoottorin tai polttomoottorin, pyörimisnopeuden muuttaminen käyttökohteeseen sopivaksi. Väliytysuhde voi olla vaihteen rakenteesta riippuen kiinteä, portaattaaisesti säädettävä tai portaattomasti säädettävä, jolloin vaihdetta kutsutaan variaattoriksi. (Airila, M. & Käkimäki, M., 1987, s. 242)

Vaihteiden väliytysuhde on ensiö- ja toisioakselin kulmanopeuksien ja pyörimisnopeuksien suhde. Väliytysuhde voidaan laskea kaavalla:

$$i = \frac{\omega_a}{\omega_b} = \frac{n_a}{n_b} \quad (1)$$

, jossa  $i$  on väliytysuhde,  $\omega$  on kulmanopeus ja  $n$  on pyörimisnopeus. Alaindeksi a vastaa ensiöakselia ja alaindeksi b vastaa toisioakselia. Väliytysuhde on positiivinen, jos ensiö- ja toisioakseli pyörivät samaan suuntaan, ja negatiivinen, jos akselit pyörivät samaan suuntaan. (Airila, M. & Käkimäki, M., 1987, s. 244; Bolton, W., 1995, s. 110; Molian, S., 1997, s. 177)

Hammaspyörävaihteet ovat mekanismeja, jotka ovat hyvin laajalti käytössä pyörimisliikkeen välitykseen ja muuttamiseen. Vaihteita käytetään, kun pyörivän laitteen pyörimisnopeutta tai vääntömomenttia halutaan muuttaa käyttökohteeseen sopivammaksi. (Bolton, W., 1995, s. 109)

Kosketusasemasta riippumatta hammavälitys on pakkoliikkeinen ja väliytysuhde säilyy vakiona. Tavallisesti käyttävän koneen pyörimisnopeutta halutaan alentaa, joten väliytysuhde on suurempi kuin 1. (Airila, M. & Käkimäki, M., 1987, s. 244)

Hammasvaihteilla on tavallisesti hyvä hyötysuhde ja jokaisen hammaskosketuksen häviö on vain noin 1 % välitetystä tehosta. Tavallisessa hammasvaihteessa tehohäviöt tuottavat ongelmia vasta suuria tehoja välitettäessä, jolloin vaihteen lämpeneminen alkaa olla ongelma. (Molian, S., 1997, s. 195)

Episykliset hammasvaihteet poikkeavat tavallisista hammasvaihteista. Episyklisellä hammasvaihteella voi olla samoilla hammaspyörillä tavallista hammasvaihdetta parempi

hyötysuhde, mutta väärin suunniteltuna episyklinen hammasvaihde ei välttämättä toimi ollenkaan. (Molian, S., 1997, s. 196)

### 3.1 Vaihteiden tärkeitä ominaisuuksia

Mekatroniikan käyttökohteissa vaihteiden suorituskykyä pystytään kuvaamaan useilla eri tunnusluvuilla, jotka kuvaavat vaihteen dynaamista käyttäytymistä ja tarkkuutta. Valmistajat tavallisesti antavat tärkeimmät näistä tunnusluvuista, mutta niiden luotettavuuden testaaminen on vaikeaa, koska testit edellyttävät testaamiseen tarkoitettua laitteistoa. (Airila, M., 1993, kappale 7 s. 27)

Vällys tai jousto ("backlash") kuvaa toisioakselin liikettä, kun ensiöakseli on lukittu. Toisioakseli pääsee kääntymään vaihteen osien välyksien tai joustamisen verran. Jos toisiopuolella on asemaa mittaava anturi, anturi voi näyttää epämääräisiä lukemia, kun ensiöpuolelle ei kohdisteta momenttia. Säästöjärjestelmä pyrkii korjaamaan asemaa, mutta välyksen vuoksi liike menee helposti yli ja järjestelmä jää värähtelemään. (Airila, M., 1993, kappale 7 s. 27)

Tavallisesti vaihteilla on suuri lepokitka ja liikekitka on pienimmillään optimaalisella pyörimisnopeudella. Käytännössä toisioakseli kiertyy tietyllä ensiöakselin momentilla vähemmän kuin pelkkä vääntöjousto edellyttää, koska osa momentista kuluu kitkan voittamiseen. Vastaavasti ensiöakselin vääntömomenttia vähennettäessä toisioakselin kiertymä palautuu hitaammin. Välyksettömällä vaihteella joustokäyrä on eri momenttia kasvatettaessa ja vähennettäessä, ja joustokäyrien väliin jäävä hystereesisilmukka kuvaa vaihteen kitkahäviöitä. (Airila, M., 1993, kappale 7 s. 28)

Ensiöakselin nollamomentin kohdalle jää hystereesistä ja välyksestä johtuva epämääräinen alue, joka aiheuttaa ongelmia säädön kannalta. Hystereesin ja välyksen yhteisvaikutusta kutsutaan vaihteen hukkaliikkeeksi ja se kuvaa toisioakselin kiertymää ensiöakselin nollamomentilla. Hyvässä servovaihteessa hukkaliike on mielellään alle 6 ja parhaimmillaan 1-2 kulmam minuuttia. (Airila, M., 1993, kappale 7 s. 29)

Joissakin vaihteissa kuormitus aiheuttaa niin suuria muodonmuutoksia, että teoreettinen välityssuhde muuttuu hetkellisesti. Mekatroniikan käyttökohteiden vaihteissa

välityssuhdepoikkeama on tavallisesti 0,5-1 kulmam minuutin luokkaa. (Airila, M., 1993, kappale 7 s. 30)

## 3.2 Vaihdetyytit

Robottien lisääntyessä on kasvanut tarve suuren alennuksen, suuren vääntömomentin ja pienen välyksen omaaville toimilaitteille. Tällä hetkellä harmoniset vaihteet ovat yleisin valinta, kun suuri alennus ja pieni koko ovat toimilaitteelta haluttuja ominaisuuksia. Kaupallisesti harmonisia vaihteita löytyy kuitenkin rajoitetuilla välityssuhdevaihtoehtoilla ja niiden massa kasvaa huomattavasti, kun suurta vääntömomenttia tarvitaan. Syklodiset vaihteet tarjoavat hyvän vaihtoehdon harmonisille vaihteille, sillä ne tarjoavat suuren välityssuhteen pienessä paketissa ja suuremmalla vääntömomentilla. (Farrell, L. et al, 2018, s. 1)

Mekatroniikan käyttökohteissa vaihteen ensioakseli liitetään tavallisesti nopeaan servo- tai askelmoottoriin ja tosioakselin liikkeellä saadaan aikaiseksi esim. robotin käsivarren kiertymä. Tarkkuus ja riittävät dynaamiset ominaisuudet ovat tärkeitä ominaisuuksia mekatroniikan käyttökohteissa oleville vaihteille. Mekatroniikan käyttökohteissa vaihteiden tulee olla luotettavia jaksottaisessa kuormituksessa, mutta pitkäaikaiskestävyys täydellä momentilla ja pyörimisnopeudella ei ole välttämätöntä. (Airila, M., 1993, kappale 7 s. 27)

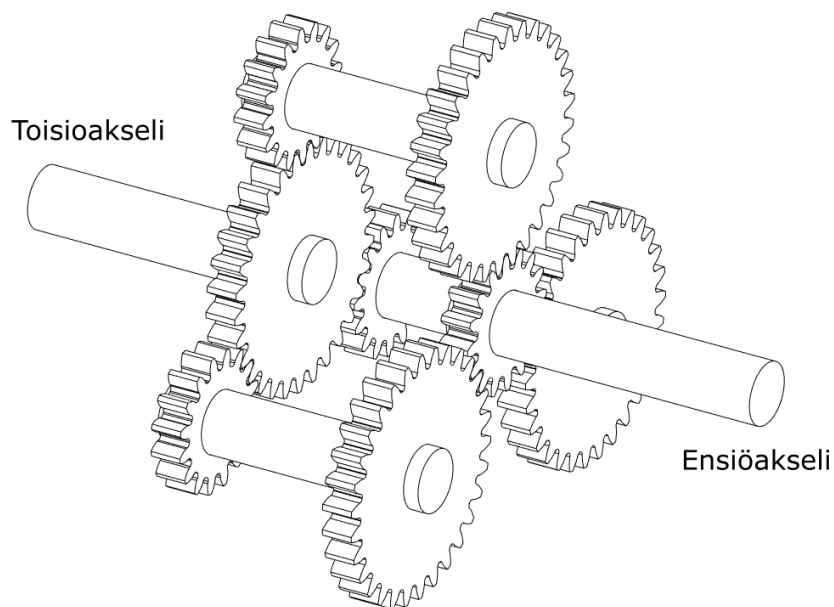
Harmoninen vaihde (Harmonic Drive) sekä trokoidivaihteisiin kuuluvat syklodinen vaihde (Cyclo Drive) ja kiertovektorivaihde (Rotary Vector Gear, ”RV-vaihde”) ovat tavallisimmin mekatroniikassa käytettyjä vaihteita. Rakenteeltaan kaikki edellä mainitut vaihteet ovat koaksiaalivaihteita, koska niiden ensio- ja tosioakseli ovat samalla suoralla. (Airila, M., 1993, kappale 7 s. 27)

### 3.2.1 Planeettavaihde

Episykliset hammasvaihteet, jotka tunnetaan myös planeettavaihteina, ovat laajalti käytössä monissa auto-, ilma- ja meriteknisissä sovelluksissa. Planeettavaihteilla on monia etuja yksinkertaisiin hammasvälityksiin verrattuna ja niiden etuihin kuuluu laajalti valittava välityssuhde, johon voidaan vaikuttaa vaihteen osien valinnoilla. Lisäksi planeettavaihde on mahdollista valmistaa kompaktisti ja hyvällä vääntömomentti-massa-

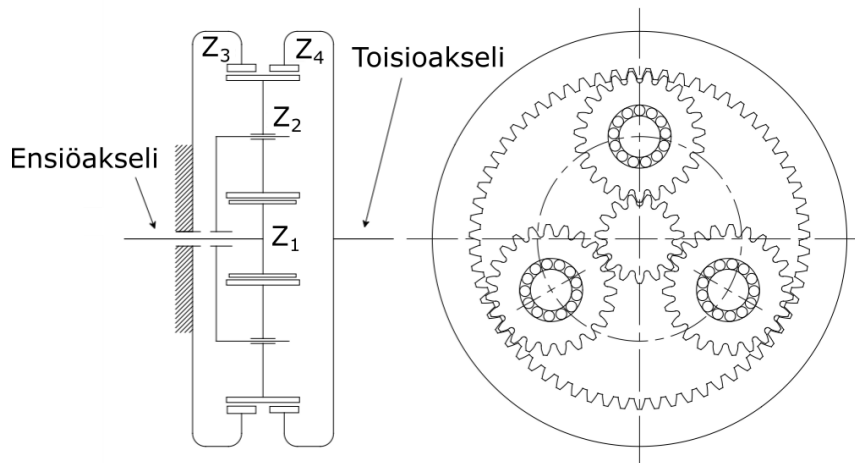
suhteella sen rinnakkaisen rakenteen ansiosta. (Gang, A., Guangqiang, Y. & Renjing, L., 2018, s. 508; Qin, Z. et al, 2019, s. 5943)

Planeettavaihteet koostuvat aurinkopyörästä, joka pyörii kiinteän pääakselin ympäri, ja siihen varrella kytketyistä planeettapyöristä, jotka pyörivät aurinkopyörän ympärillä. Ensiö- ja toisioakseli voidaan planeettavaihteissa asentaa samakeskeisesti paremman tehon ja vääntömomentin aikaansaamiseksi, mutta tällöin voima pitää välittää kolmen planeettapyörän kautta (kuva 2). Ensiö- ja toisioakseli voidaan saada samankeskeisiksi myös sisähampailla varustetulla kehäpyörällä, joka on rynnössä vaihteen planeettapyörien kanssa. (KHK, 2019; Bolton, W., 1995, s. 112-113)



**Kuva 2.** Yksinkertainen planeettavaihde (mukaillen KHK, 2019).

James Ferguson-tyyppin planeettavaihde käyttää hyväksi James Fergusonin mekanismiksi kutsuttua hammaspyöräasetelmaa, jossa yksi planeettapyörä pyörittää kahta tai kolmea siihen kytkettyä kehäpyörää samaa hammaspintaa vasten. James Fergusonin mekanismi mahdollistaa planeettavaihteessa suuren välityssuhteen ja kompaktin rakenteen. Kuvassa 3 näkyy rakenteellinen esimerkki James Ferguson-tyyppin planeettavaihteesta. Planeettapyörä  $Z_2$  on kontaktissa kahden kehäpyörän  $Z_3$  ja  $Z_4$  kanssa samalla hammaspinnalla. (Valex, P., 2014, s. 429-430)



**Kuva 3.** Rakenteellinen esimerkki James Ferguson-tyypin planeettavaihteesta (mukaillen Velex, P., 2014, s. 430).

James Ferguson-tyypin planeettavaihteen välityssuhde lasketaan kaavalla:

$$i = \frac{1 + \frac{Z_3}{Z_1}}{1 - \frac{Z_3}{Z_4}} \quad (2)$$

, jossa  $i$  on välityssuhde,  $Z_1$  on aurinkopyörän hammasluku,  $Z_2$  on planeettapyörän hammasluku, ja  $Z_3$  ja  $Z_4$  ovat kahden kehäpyörän hammasluvut. Kehäpyörästä  $Z_4$  on suuremmalla hammasluvulla kuin  $Z_3$ . James Ferguson-tyypin planeettavaihteessa käytettävä planeettapyörien määrä saadaan kehäpyörien hammaslukujen erotuksena ( $Z_4 - Z_3$ ). (Velex, P., 2014, s. 429)

Tavallisesti planeettavaihteen välityssuhde ei voi olla suurempi kuin 14, mutta James Ferguson-tyypin planeettavaihteella välityssuhde voi olla jopa suurempi kuin 100. Hampaiden interferenssit pitää tarkistaa kahteen kertaan, koska James Ferguson-tyypin planeettavaihteessa käytetään ulkokehällä kahta kehäpyörää. (Velex, P., 2014, s. 429-430)

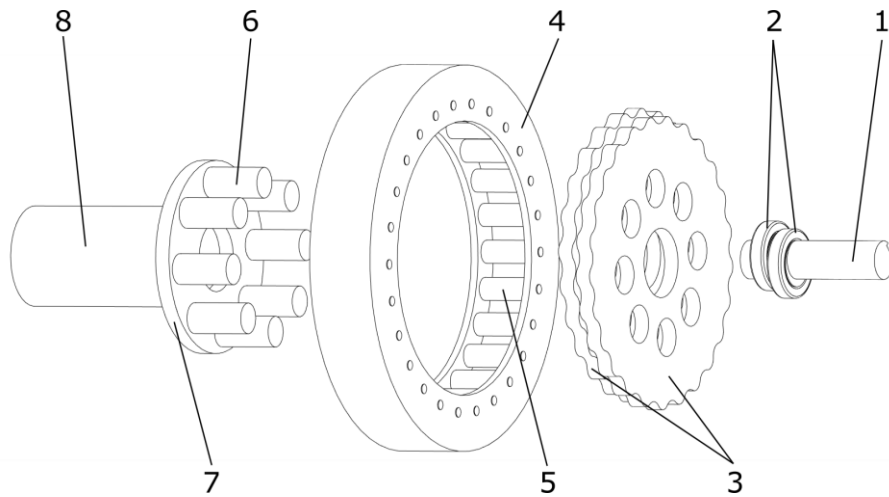
Monimutkaisen rakenteen ja planeettapyörästä toimintaperiaatteen vuoksi planeettavaihteessa esiintyy helposti värähtelyä, mikä vaikuttaa käyttötarkkuuteen, välityksen hyötysuhteeseen ja käyttöikään. Hammaspyörien vikaantuminen ja melu ovat yleisiä ongelmia, jotka ovat peräisin rakenteen virheistä, valmistusmenetelmien

epätarkkuuksista ja rakenteellisten ominaisuuksien muutoksista. (Gang, A., Guangqiang, Y. & Renjing, L., 2018, s. 508; Qin, Z. et al, 2019, s. 5943)

### **3.2.2 Syklodinen vaihde**

Syklodinen vaihde on trokoidityyppinen avoin planeettavaihde, joka on laajalti käytetty teollisuudessa sen suuren alennussuhteen, kuormituskyvyn ja hyötysuhteen vuoksi. Viime aikoina syklodiset vaihteet ovat saaneet huomiota myös robotiikassa, ilmailussa ja tarkkuustyöstökoneissa sen pienen välyksen, kompaktin koon, suuren alennustarkkuuden, suuren vääntölujuuden ja suuren iskunkestävyyden ansiosta. Syklodinen vaihde on harmonisen vaihteen kilpailija keskisuurten ja suurten robottien toimilaitteissa. (Datong, Q., 2016, s. 137; Hsieh, C.F., 2015, s. 15; Velez, P., 2014, s. 428-429; Airila, M., 1993, kappale 7 s. 36)

Syklodinen alennusvaihde koostuu tavallisesti kahdesta tai kolmesta syklodisella hammasprofiililla varustetusta syklodilevystä, joita ensiöakselin epäkeskoilla ajetaan kehäpyörän tappeja tai rullia vasten. Tavallisesti kehäpyörällä on rullia yksi enemmän kuin syklodilevyissä on nokkia. Normaalisissa alennusvaihdekäytössä kehäpyörä on lukittu vaihteen runkoon ja ensiöakseli pyörittää kahta 180 asteen tai kolmea 120 asteen vaihtesiirrolla olevaa epäkeskoa. Ensiöakselin liike siirtyy epäkeskojen ulkopinnoille laakeroiduille kahdelle tai kolmelle syklodilevylle, jotka vastaavat tämän vaihteen planeettapyöriä. Syklodilevyt liikkuvat epäkeskon ohjaamina kehäpyörän rullia pitkin. Syklodilevyissä olevat reiät ohjaavat toisioakselin rullia ja siirtävät syklodilevyjen kehänsuuntaisen liikkeen toisioakselille. Toisioakseli pyörii syklodisessa vaihteessa vastakkaiseen suuntaan kuin ensiöakseli. Kuvassa 4 näkyy rakenteellinen esimerkki syklodisesta vaihteesta. (Velez, P., 2014, s. 428; Airila, M., 1993, kappale 7 s. 37)



**Kuva 4.** Sykloidisen vaihteen rakenne. 1 = ensiöakseli, 2 = laakeroidut epäkeskot, 3 = sykloidilevyt, 4 = kehäpyörä, 5 = kehäpyörän rullat, 6 = toisioakselin rullat, 7 = toisioakselin rullien kantaja ja 8 = toisioakseli (mukaillen Kostic, N. et al, 2018, s. 17).

Sykloidisen vaihteen kehäpyörän rullat voidaan toteuttaa kolmella eri tavalla. Ensimmäisessä rakenteessa ontot rullat kiinnitetään kehäpyörään niiden läpi asennetuilla akseleilla. Tällä saavutetaan hyvä hyötysuhde, mutta tätä rakennetta ei voida toteuttaa pienessä koossa. Toisessa rakenteessa rullat asennetaan kehäpyörässä oleviin koloihin, joissa ne pääsevät pyörimään. Tämä mahdollistaa pienempien rullien käyttämisen, mikä on tärkeää robotiikan kannalta. Kolmannessa rakenteessa rullat on integroitu osaksi kehäpyörän muotoa, mikä vähentää tarvittavien osien määrää. (Sensinger, J.W., & Lipsey, J.H., 2012, s. 4132; Hsieh, C.F., 2015, s. 16)

Sykloidisen vaihteen kehäpyörä ja akselit voidaan kukin lukita tai ottaa käyttöön ensiö- ja toisioakseliksi, jolloin sykloidisesta vaihteesta saadaan alennus-, ylennys- tai differentiaalivaihte. Käytännössä sykloidisia vaihteita käytetään kuitenkin lähes pelkästään alennusvaihteina. Sykloidisen vaihteen välityssuhde saadaan suoraan sykloidilevyjen nokkien lukumäärästä, kun kehäpyörä on lukittu ja kehäpyörän rullia on yksi enemmän kuin sykloidilevyn nokkia. Tässä tapauksessa sykloidisen vaihteen välityssuhde voidaan siis laskea kaavalla:

$$i = Z_2 - 1 = Z_1 \quad (3)$$

, jossa  $i$  on välityssuhde,  $Z_1$  on syklodilevyn nokkien lukumäärä ja  $Z_2$  on kehäpyörän rullien lukumäärä. (Shin, J.-H. & Kwon, S.-W., 2006, s. 600; Airila, M., 1993, kappale 7 s. 36-37)

Jos kehäpyörää käytetään ulostulona, syklodilevyn alennusvaihteen välityssuhde voidaan laskea kaavalla:

$$i = \frac{Z_2}{Z_2 - Z_1} \quad (4)$$

Tässä tapauksessa välityssuhde on tavallisesti suoraan kehäpyörän rullien lukumäärä, koska rullia on yksi enemmän kuin syklodilevyn nokkia. (Valex, P., 2014, s.428)

Syklodilevyn profiilin kaava karteesisessa koordinaatistossa:

$$\begin{cases} C_x = R \cos \theta - R_r \cos \left( \theta + \tan^{-1} \left( \frac{\sin(1 - Z_2)\theta}{\left(\frac{R}{EZ_2}\right) - \cos(1 - Z_2)\theta} \right) \right) - E \cos(Z_2\theta) \\ C_y = -R \sin \theta + R_r \sin \left( \theta + \tan^{-1} \left( \frac{\sin(1 - Z_2)\theta}{\left(\frac{R}{EZ_2}\right) - \cos(1 - Z_2)\theta} \right) \right) + E \sin(Z_2\theta) \end{cases} \quad (5)$$

$(0^\circ \leq \theta \leq 360^\circ).$

, jossa  $R$  on kehäpyörän säde,  $R_r$  on kehäpyörän rullien säde,  $E$  on epäkeskon epäkeskeisyys ja  $Z_2$  on kehäpyörän rullien lukumäärä. Tämä kaava toimii, kun syklodilevyn nokkien lukumäärä on yhden pienempi kuin kehäpyörän rullien lukumäärä. (Shin, J.-H. & Kwon, S.-W., 2006, s. 602)

Syklodilevyn vaihteen epäkeskon epäkeskeisyyttä rajoittaa ehto:

$$E \leq \frac{D}{2Z_2} \quad (6)$$

, jossa  $E$  on epäkeskon epäkeskeisyys,  $Z_2$  on kehäpyörän rullien lukumäärä ja  $D$  on kehäpyörän rullien kautta piirretyn ympyrän halkaisija. Liian pienellä epäkeskeisyydellä



sykloidilevy liukuu helposti kehäpyörän rullien ohi, jos valmistustarkkuus ei ole riittävä. (TECS, 2019)

Sykloidilevyssä olevien toisioakselin rullia pyörittävien reikien säde määräytyy kaavalla:

$$R_h = R_p + E \quad (7)$$

, jossa  $R_h$  on toisioakselin rullia pyörittävien reikien säde,  $R_p$  on toisioakselin rullien säde ja  $E$  on epäkeskon epäkeskeisyys. (TECS, 2019)

Vaihdetta valmistetaan tavallisesti yksi-, kaksi- tai kolmiportaisena. Yksiportaisella vaihteella päästään välityssuhteisiin 6–119, kaksiportaisella vaihteella enintään muutamaan tuhanteen ja kolmiportaisella vaihteella välityssuhde voi olla jopa satoja tuhansia. Sykloidisella alennusvaihteella on hyvä hyötysuhde ja hampaiden kestävyys sykloidisen profiilin vuoksi. (Airila, M., 1993, kappale 7 s. 36-37; Vex, P., 2014, s. 428-429)

Sykloidisilla vaihteilla on paljon haluttuja ominaisuuksia, jotka perustuvat hyvin vahvasti sen teoreettiseen toimintaan. Teoreettisesti sykloidisen vaihteen kehäpyörän kaikki rullat ovat samanaikaisesti kontaktissa sykloidilevyn nokkien kanssa ja puolet niistä välittävät vääntömomenttia. Teoriassa sykloidisen vaihteen kontaktipinnoilla esiintyy pelkää vierintää ilman liukumista. Näin ei kuitenkaan todellisuudessa tapahdu, koska sykloidista vaihdetta ei pystytä valmistamaan teoreettisen toiminnan vaatimalla tarkkuudella. (Farrell, L. et al, 2018, s. 2; Datong, Q., 2016, s. 137; Vex, P., 2014, s. 428-429)

Vaikka sykloidessa vaihteessa on akseliin nähden epäkeskeisesti sijaitsevia pyöriviä osia, vaihde on ulkoisesti lähes tasapainossa niiden sopivan vaihesiirron ansiosta. Eri tasoissa sijaitsevista epäkeskeisistä massoista syntyy kuitenkin pieni kiertävä momentti. Tämä kuormitus jakautuu kuitenkin usean viivakosketuksen kesken, joten vaihde kestää hyvin hetkellistä ylimomenttia. Haittapuolena kuormituksesta aiheutuu kuitenkin lepokitkan kasvaminen. (Airila, M., 1993, kappale 7 s. 39)

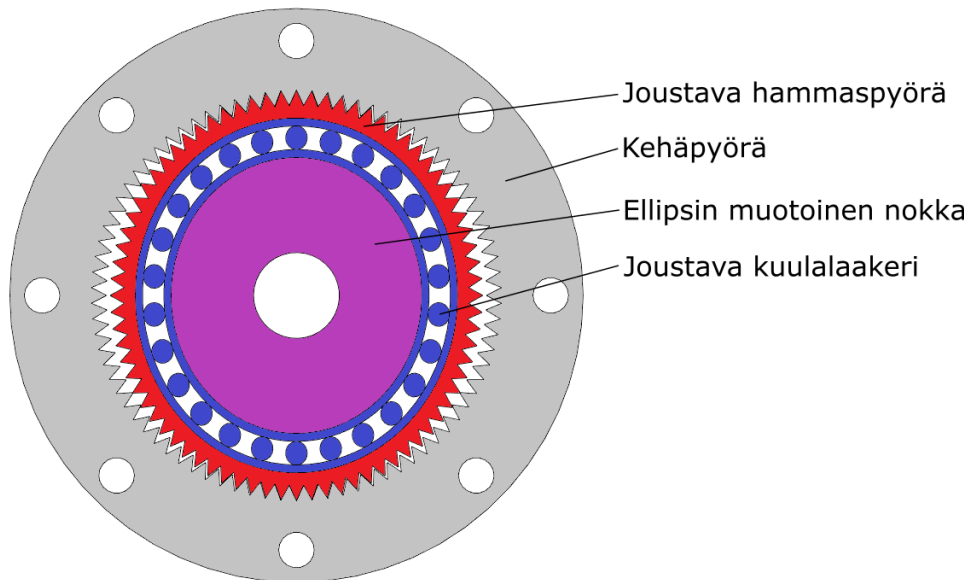
Sykloidinen vaihde soveltuu jopa 3600 rpm ensioakselin pyörimisnopeuksille ja yksiportainen sykloidinen vaihde riittää usein mekatroniikan sovelluksiin, jolloin vaihde pysyy kompaktina ja kevyenä. Yksiportaisen sykloidisen vaihteen hyötysuhteeksi

ilmoitetaan jopa 94 %, mutta useammalla portaalla vaihteen hyötysuhde huononee. Standardivaihteiden hukkaliike on 2–3 kulmam minuuttia ja hitausmomentti on suhteellisen pieni, koska vain pieni osa massoista pyörii ensiöakselin mukana. Käyttösovelluksesta ja koosta riippuen vaihteissa käytetään rasvavoitelua, öljykylypyvoitelua tai kiertoöljyvoitelua. (Airila, M., 1993, kappale 7 s. 39)

### 3.2.3 Harmoninen vaihde

Harmoninen vaihde (harmonic drive), eli joustokehävaihde, on robotiikassa yleisesti käytetty vaihde. Harmonista vaihdetta käytetään tavallisesti alennusvaihteena, mutta pienin rajoituksin sitä voidaan käyttää myös ylennysvaihteena. Differentiaalivaihteena harmonista vaihdetta käytetään pienten nopeuserojen aikaansaamiseksi. Harmonisen vaihteen etuihin kuuluu suuri välityssuhde, kevyt ja kompakti rakenne, erittäin pieni välily, ja suuri alennuksen tarkkuus. Harmonisten vaihteiden välityssuhteet ovat tavallisesti luokkaa 100–300, mutta hyvin valmistetulla harmonisella vaihteella voidaan päästä jopa 320 välityssuhteeseen. Harmonisia vaihteita käytetään robotiikan lisäksi paljon teollisuudessa ja ilmailussa. (Airila, M., 1993, kappale 7 s. 31; Velez, P., 2014, s. 427-428; Hadas, Z. & Garami, B., 2016, s. 1; Morecki, A., Knapczyk, J., 2014, s. 270)

Harmonisia vaihteita valmistetaan kuppimallina ja laippamallina. Kuppimallinen harmoninen vaihde on suosittu robottien alennusvaihteena ja kinemaattisesti se on verrattavissa planeettavaihteeseen, josta puuttuu aurinkopyörä. Laippamaisessa harmonisessa vaihteessa ulkokehä on kaksiosainen ja se vastaa kinemaattisesti Ferguson-tyyppin planeettavaihdetta. Kuvassa 5 näkyy esimerkki kuppimallisen harmonisen vaihteen rakenteesta. Harmonisen vaihteen tärkeimmät osat ovat ohutreunainen joustava hammaspyörä, kehäpyörä, ellipsin muotoinen nokka ja joustava kuulalaakeri, joka muuttaa muotoaan nokan pyöriessä. Joustava hammaspyörä on halkaisijaltaan hieman kehäpyörää pienempi ja siinä on tavallisesti kaksi hammasta vähemmän kuin ulkokehällä. Laakeroitu nokka pitää joustavan hammaspyörän ellipsin muodossa, kun se on kontaktissa kehäpyörän hampaisiin. Kun nokka pyörii myötäpäivään, hammaskontaktialue matkustaa nokan ellipsin huippujen mukana. Kun nokka on kääntynyt 180 astetta, joustava hammaspyörä on matkustanut ulkokehällä yhden hampaan verran. Jokainen nokan pyörähdys myötäpäivään pyörittää joustavaa hammaspyörää kahden hampaan verran vastapäivään. (Airila, M., 1993, kappale 7 s. 31-34; Velez, P., 2014, s. 427-428; Hadas, Z. & Garami, B., 2016, s. 2; Morecki, A., Knapczyk, J., 2014, s. 270)



**Kuva 5.** Rakenteellinen esimerkki kuppimallisesta harmonisesta vaihteesta (mukaillen Velex, P., 2014, s. 428).

Kun kehäpyörä on lukittu vaihteen runkoon ja joustavaa hammaspyörää käytetään toisioakselina, kuppimallisen harmonisen vaihteen välityssuhde voidaan laskea kaavalla:

$$i = \frac{Z_3}{Z_3 - Z_0} \quad (8)$$

jossa  $Z_3$  on joustavan hammaspyörän hammasluku ja  $Z_0$  on kehäpyörän hammasluku. Suuri välityssuhde saadaan aikaiseksi, kun joustavan hammaspyörän ja kehäpyörän hammasluvut ovat lähes samat. (Morecki, A., Knapczyk, J., 2014, s. 270; Airila, M., 1993, kappale 7 s. 31-32; Velex, P., 2014, s. 427-428)

Harmonisen vaihteen välityssuhdetta rajoittaa tavallisesti kehäpyörää koskeva ehto:

$$Z_0 - Z_3 > 8 \quad (9)$$

jolla vältetään hammaspyörien kontaktihäiriöitä. (Morecki, A., Knapczyk, J., 2014, s. 270)

Harmoninen vaihde soveltuu 2500–4000 rpm ensioakselin pyörimisnopeuksille ja toisioakselin vääntömomentissa saavutetaan jopa 5000 Nm vaihdetyypin ja käyttötavan

mukaan. Välityssuhde vaihtelee tavallisesti välillä 50–320. Hukkaliike on standardivaihteilla 3–9 kulmam minuuttia ja välityssuhdevaihtelu on 0,5–2 kulmam minuuttia vaihdetyypin mukaan. Harmonisen vaihteen hyötysuhde vaihtelee laajalti vaihdekoon, pyörimisnopeuden, välityssuhteen ja kuormituksen mukaan ja on yleensä välillä 50–70%. Harmonisessa vaihteessa joustokehän muokkaustyö ja pienten hampaiden aiheuttama kitka laskevat todennäköisesti hyötysuhdetta. (Airila, M., 1993, kappale 7 s. 36)

### 3.3 Vaihteiden suunnittelu

Hampaiden ja akselien kuormituksesta aiheutuvat muodonmuutokset aiheuttavat muutoksia myös hammaskosketuksiin. Koko hammasleveyttä ei saada kuormitustilanteessa käyttöön, mutta muodonmuutosten vaikutus tulee ottaa huomioon lujuuslaskennassa hammaspyöriä mitoitettaessa. (Airila, M. & Käkimäki, M., 1987, s. 253)

Laakereiden tehtävänä on pyörivien tai edestakaisin kiertyvien koneenosien tukeminen ja ohjaaminen. Laakerit voidaan jakaa vierintälaakereihin ja liukulaakereihin. Vierintälaakerit voivat tavallisesti kantaa sekä aksiaalisia että radiaalisia kuormia ja voimia välittävät laakerin vierintäosat, jotka voivat olla kuulia, rullia tai neuloja. Liukulaakereissa voimat siirtyvät pintojen välillä suoraan voitelukalvon kautta. Laakerien häiriötön toiminta edellyttää likupintojen lämpötilojen pysymistä laakerirakenteelle sallitun lämpötilan alapuolella. (Airila, M. & Käkimäki, M., 1987, s. 155)

Vierintälaakereiden asennuksessa on huomioitava, ettei asennusvoimia johdeta vierintäosien kautta. Akseleiden laakeroinnin aksiaalivoimat tulee ottaa vastaan vain yhdellä laakerilla, jota kutsutaan ohjauslaakeriksi. Muut laakerit ovat tässä tapauksessa vapaita laakereita, joiden tulee sallia akselin pituuden muutokset ja ohjata akselia vain säteen suunnassa. (Airila, M. & Käkimäki, M., 1987, s. 193)

Laakerien sisä- ja ulkokehien tulee olla tuettuna akseliin ja laakeripesään siten, että ne pysyvät paikallaan ja paine jakautuu tasaisesti laakerin kehälle. Laakerin sovitteen tulee olla sitä tiukempi, mitä suurempi laakeriin kohdistuva kuormitus on. Liian väljällä sovitteella kuormitettu laakerikehä alkaa vierimään sovitteessaan. Laakerisovitteet riippuvat laakerin kuormituksesta, laakerityypistä, akselin halkaisijasta ja mahdollisista muotovirheistä. (Airila, M. & Käkimäki, M., 1987, s. 194)

### 3.4 Vaihteiden häiriötilanteet ja vikaantuminen

Suuri osa hammasvaihteen melusta syntyy hampaan tullessa ryntöön nopeasti kuormitettuna, mikä aiheuttaa värähtelyä. Melua syntyy lisäksi valmistusvirheistä ja laitekokonaisuuden vääntövärähtelystä. (Airila, M. & Käkimäki, M., 1987, s. 253)

Hammaspyörien vikaantumisen yleisimmät syyt ovat:

- suunniteluvirheet
- epäsopivat materiaalit
- väärin materiaaaliparien käyttö
- ongelmat valmistuksessa ja karkaisussa
- kokoamisvirheet
- liian ankarat käyttöolosuhteet
- järjestelmään kuulumattomat osat
- väärän voiteluaineen tai -tavan käyttö
- voiteluaineen puute. (Bartz, W.J. & Moore, A.J., 1993, s. 1)

Voitelu on erittäin tärkeää hammaspyörän luotettavuuden ylläpitämisessä. Tämän vuoksi oikean voiteluaineen ja voitelumenetelmän valitseminen on tärkeää hammasvaihteiden kannalta. (Bartz, W.J. & Moore, A.J., 1993, s. 1)

### 3.5 Vaihteiden jäähdytys ja voitelu

Hammaspyöräparin hampaiden rynnössä hampaat vierivät toisiinsa nähden ja tämän lisäksi esiintyy liukumaa hammaskylkien välillä. Tämä liukuma aiheuttaa kitkavoiman, joka muuttuu lämmöksi. Tärkeintä voitelun valinnan kannalta on tietää hammasvaihteen rakenne, materiaali, konfiguraatio, hammaspyörien valmistustapa ja käyttöolosuhteet. (Bartz, W.J. & Moore, A.J., 1993, s. 1-2; Airila, M. & Käkimäki, M., 1987, s. 252)

Kahden rynnössä olevan hammaspyörän voitelu poikkeaa tavallisten laakereiden voitelusta. Kun pyörimissuunta ja kuormituksen suunta pysyy samana, oikeinsunnitellun laakerin ja vierimispinnan välissä on aina ohut kantava öljykalvo. Tässä tapauksessa voitelu on jatkuvaa voitelua, eikä öljykalvo tavallisesti hajoa edes vaihtelevasta kuormituksesta. Hammaspyöräparin tapauksessa kontaktikalvon pitää uusiutua erikseen

jokaiselle hammaskontaktille. Tätä prosessia nimitetään epäjatkuvaiksi voiteluiksi. (Bartz, W.J. & Moore, A.J., 1993, s. 5)

Hammasvaihteen voitelun täytyy olla toteutettu oikein, jotta hammasvaihde toimisi halutulla tavalla. Voiteluöljyn tulee muodostaa öljykalvo hammaskylkien väliin, voidella laakerit ja tiivistimet, siirtää lämpöä, pienentää kitkaa ja minimoida kulumisen. (Airila, M. & Käkimäki, M., 1987, s. 257)

Voitelumenetelmää valittaessa on tärkeää huomioida hammaspyörien lisäksi muiden kitkapintojen voitelu. Voitelumenetelmissä on eroteltavissa kertavoitelu, katkonainen voitelu ja jatkuva voitelu. Hammaspyörän kehänopeus määrää pääasiassa tarvittavan voitelutavan. (Bartz, W.J. & Moore, A.J., 1993, s. 425; Airila, M. & Käkimäki, M., 1987, s. 257)

Hammasvaihteet, joissa lämpötilan nousu ja voitelukalvoon kohdistuva kuormitus on alhaista, ja hammaspintojen kulumisen on vähäistä, voidaan helposti voidella kerran tarttuvalla voiteluaineella. Tämän tyyppisiä hammasvaihteita ovat:

- lyhytikäiset hammasvaihteet
- harvoin tai lyhyitä aikoja käytetyt hammasvaihteet
- erittäin hitailla kehänopeuksilla pyörivät hammasvaihteet
- hammasvaihteet, jotka kuormittuvat ainoastaan pysähtyneenä.

Kertavoitelulla kehänopeus ei saisi ylittää 0,8 m/s nopeutta. Lyhytikäiset vaihteet ovat poikkeus ja niissä käytetään kertavoitelua 10 m/s tai suuremmilla kehänopeuksilla. Lyhytikäisten hammasvaihteiden tapauksessa hammaspyörien kulumisen ja vahingoittuminen on odotettavaa käyttöiän lähestyessä loppuaan. Kertavoiteluun käytetään kiinteitä voiteluainejauheita ja kiinteisiin voiteluaineisiin pohjautuvia rasvoja ja tahnoja. (Bartz, W.J. & Moore, A.J., 1993, s. 425-426)

Jos hammasvaihteelle asetetaan vaatimukset, joita ei voida täyttää kertavoitelulla, on suositeltavaa käyttää katkonaista voitelua. Näitä vaatimuksia ovat:

- pitempi käyttöikä
- pitempi yksittäinen käyttöaika
- suuremmat kehänopeudet

- käytön aikana esiintyvä paikoittainen suuri kuormitus.

Katkoinaiseen voiteluun kuluu jaksottainen voiteluaineen lisäys, eikä hammaspyörän kehänopeus saisi olla suurempi kuin 1 m/s. Katkonainen voitelu muuttuu puolijatkuvaksi voiteluksi, kun voiteluaineen lisäysväli lyhenee. (Bartz, W.J. & Moore, A.J., 1993, s. 426)

Suuria tehoja välittävissä koteloiduissa vaihteissa jatkuva voitelu on käytännössä ainut vaihtoehto ja se voidaan toteuttaa roiskevoiteluna, pumppuavusteisena roiskevoiteluna tai painevoiteluna. Vaihteen kotelo toimii roiskevoitelussa voiteluainesäiliönä ja sen tehtävänä on myös voiteluaineen jäähdyttäminen. Roiskevoitelussa hammaspyörät ovat osittain upotettuna voiteluaineeseen. Voiteluaine voi olla rasvaa tai öljyä. Rasva siirtää öljyä heikommin lämpöä, joten rasvavoitelulla kehänopeuden yläraja on 4 m/s. Öljyn roiskevoitelua voidaan joissakin tilanteissa käyttää jopa 60 m/s kehänopeudella. Suuremmilla kehänopeuksilla käytetään painevoitelua. Painevoitelulaitteiston suuresta hinnasta johtuen yleisin ratkaisu on roiskevoitelu. (Bartz, W.J. & Moore, A.J., 1993, s. 426-427; Airila, M., Käkimäki, M., 1987, s. 256-257)

## 4 VALMISTUSMENETELMÄT JA MATERIAALIT

Valmistuksessa tehdään osia tai tuotteita muokkaamalla fyysisten ja kemiallisten prosessien avulla lähtöaineen geometriaa, ominaisuuksia ja ulkomuotoa. Valmistukseen käytettyihin prosesseihin kuuluu monipuolisesti laitteistoa, työkaluja, ja työvoimaa. Valmistus koostuu lähes aina useista eri työvaiheista, jotka tuovat lähtöainetta lähemmäs haluttua lopullista tilaa. (Groover, M.P., 2011, s. 2)

### 4.1 Valmistusmenetelmät

Valmistusmenetelmät voidaan eritellä jalostusprosesseihin ja kokoamisprosesseihin. Jalostuksessa käyttöaineen geometriaa, ominaisuuksia ja ulkomuotoa muokataan fyysisesti tai kemiallisesti, jotta se saataisiin lähemmäs lopullista haluttua tilaa. Tavallisesti jalostusprosesseja käytetään erillisiin osiin, mutta joitakin jalostusprosesseja voidaan käyttää myös koottuihin tuotteisiin. Kokoamisprosessissa yhdistetään kaksi tai useampi osa kokoonpanoksi tai osakokoonpanoksi. (Groover, M.P., 2011, s. 8)

#### 4.1.1 Jyrsintä

Jyrsintä kuuluu lastuaviin työstömenetelmiin. Lastuavilla työstömenetelmillä poistetaan lähtöaineesta ylimääräistä ainetta halutun geometrian saavuttamiseksi. Lastuavia työstömenetelmiä käytetään tavallisesti metalleihin, mutta niitä voidaan käyttää myös puulle ja muoville. Jyrsinnän etuihin kuuluu mittatarkkuus ja nopea kappaleenvaihto. Muita tärkeimpiä lastuavia työstömenetelmiä ovat sorvaus ja poraus. (Valmistajat, 2020b; Valmistajat, 2020c; Groover, M.P., 2011, s. 10-11)

Jyrsinnässä jyrsimen pöytään kiinnitettyä työstettävää kappaletta liikutellaan pyörivää terää vasten. Jyrsintä voidaan ohjata käsin tai tietokoneen avulla, jolloin puhutaan CNC-jyrsinnästä. CNC-jyrsimellä saadaan valmistettua monipuolisiakin muotoja, kuten hammaspyöriä ja upotuskuvioita. (Valmistajat, 2020b; Valmistajat, 2020c)

Kappaleen kuumentumista voidaan estää jäähdyttämällä kappaletta voitelevalla lastuamisnesteellä, joka on tavallisesti veden ja öljyn sekoitusta. (Valmistajat, 2020c)



Jyrsinnällä päästään helposti  $\pm 0,1$  mm:n toleranssiin. Jyrsityn pinnan pinnankarheuteen ja kiiltävyyteen voidaan vaikuttaa työstönopeuksilla. Hitaammalla työstönopeudella saadaan tavallisesti aikaan sileämpi pinta. (Valmistajat, 2020b)

#### **4.1.2 Valaminen**

Valaminen on valmistusmenetelmä, jossa nestemäistä valmistusmateriaalia ohjataan muottiin ja muotissa materiaali jähmettyy muotin muotoon. Valamista voidaan käyttää eri materiaaleille, kuten metalleille, muoveille ja keraameille. Valamista hyödynnetään useilla eri teollisuuden aloilla ja esimerkiksi autojen moottorit ovat tyypillisesti ensin valettuja ja sitten koneistettuja. (Groover, M.P., 2011, s. 97; Valmistajat, 2020e)

Valaminen voidaan yleisesti jakaa harkkoihin ja muotoon valamiseen. Harkolla tarkoitetaan suurta valukappaletta, joka on muodoltaan yksinkertainen ja tarkoitettu myöhempään muotoiluun esimerkiksi takomalla. Muotoon valamisessa valmistetaan monimutkaisempia geometrioita, jotka ovat lähempänä tuotteen tai osan lopullista muotoa. (Groover, M.P., 2011, s. 97-98)

Valamisen haittapuolina on tavallisesti heikko pinnanlaatu, rakenteen mahdolliset jännitykset ja se, että valamisella ei välttämättä saada valmistettua tarpeeksi ohuita kappaleita. (Valmistajat, 2020e)

#### **4.1.3 Vesileikkaus**

Vesileikkauksessa käytetään ohutta, suuripaineista ja suurella nopeudella virtaavaa vesisuihkua työstettävän kappaleen leikkaamiseen. Vesileikkauksella voidaan leikata kappaleita irti ohuesta levystä. Vesileikkauksella voidaan leikata ohuita muoveja, tekstiilejä, komposiitteja, nahkaa ja pahvia. Vesileikkausta ei voida käyttää hauraisiin materiaaleihin kuten lasiin, koska ne hajoavat helposti leikkauksen aikana. (Groover, M.P., 2011, s. 458-459)

Kun vesileikkausta käytetään metalleihin, vesisuihkuun lisätään hiukkasia leikkauksen helpottamiseksi. Tätä kutsutaan abrasiiviseksi vesileikkaukseksi. Abrasiivinen vesileikkaus sopii metallien lisäksi myös paksujen teknisten muovien, kumilevyjen, filmivanerin, kiven ja keraamien leikkaamiseen. (Groover, M.P., 2011, s. 459; Jetmasters, 2021)

#### 4.1.4 3D-tulostus

3D-tulostimet kuuluvat materiaalia lisääviin valmistusmenetelmiin. 3D-tulostusta käytetään tavallisesti prototyypeihin ja piensarjatuotantoon. 3D-tulostimia on monenlaisia, mutta ne kaikki toimivat samalla peruseriaahteella. 3D-tulostuksessa tuote rakennetaan kerros kerrokselta tulostustasolle. (Horvath, J. & Cameron, R., 2020, kappale 2; Valmistajat, 2020d)

Tavallisimmat 3D-tulostimet käyttävät materiaalina muovisia lankakeloja, joissa muovi sulatetaan ja asetetaan paikalleen tuotteen rakennuksen aikana. Lankakeloja käyttävillä 3D-tulostimilla kerrospaksuus on tavallisesti 0,2 mm luokkaa. (Horvath, J. & Cameron, R., 2020, kappale 2)

3D-tulostuksessa tuotteen valmistus alkaa tavallisesti tuotteen CAD-mallista, josta saadaan tulostamiseen tarvittavia tietoja kuten numeeriset ohjauskomennot kerrosten muodostusta varten. Ohjauskomentojen lataamisen jälkeen 3D-tulostin lämmittää suuttimen ja usein myös tulostustason. Tulostuksen kannalta oikean lämpötilan saavuttamisen jälkeen 3D-tulostin rakentaa tuotteen kerros kerrokselta sulaa muovia pursottamalla. Tulostuksen onnistuminen riippuu paljolti ensimmäisen kerroksen tarttumisesta tulostustason pintaan. (Valmistajat, 2020d; Horvath, J. & Cameron, R., 2020, kappale 2)

Yleisin 3D-tulostuksessa käytetty lankakelan materiaali on PLA (Polylactic Acid). PLA sulaa suhteellisen pienissä lämpötiloissa ja tarttuu helposti useisiin eri materiaaleihin. (Horvath, J. & Cameron, R., 2020, kappale 2)

#### 4.1.5 Laserleikkaus

Laserleikkaus poistaa työstettävästä kappaleesta ainetta laserin energialla höyrystämällä ja ablaatiolla. Tavallisesti laserleikkauksessa käytetään hiilidioksidilasereita tai puolijohdelasereita. Laserleikkausta voidaan käyttää reikien tekemiseen, kappaleiden leikkaamiseen, urien leikkaamiseen ja kappaleen pinnalle piirtämiseen tai kirjoittamiseen. (Groover, M.P., 2011, s. 469)

Laserleikkausta käytetään tavallisesti ohuiden levykappaleiden työstämiseen. Laserleikkaukseen sopivia materiaaleja ovat pehmeät metallit, keraamit, lasi, akryyli, muovit, kumit, kankaat ja puu. Metallin leikkaukseen käytettävät laserleikkurit ovat

huomattavasti tehokkaampia. Laserleikkauksen etuna on tarkka leikkausjälki. Pienen lämmöntuonnin ansiosta laserleikkauksella voidaan leikata kapeasti ja tarkasti monimutkaisiakin kuvioita ilman materiaalin vääntymistä. Laserleikkauksen jälkeen vältetään usein perinteisen leikkauksen jälkeiseltä työltä, kuten kappaleen oikaisulta tai leikkausreunojen siistimiseltä. (Groover, M.P., 2011, s. 469-470; KILT Laser, 2018)

## **4.2 Materiaalit**

Useimmat koneenrakennusmateriaalit voidaan luokitella kolmeen peruskategoriaan: metalleihin, keraameihin ja polymeereihin. Niiden mekaaniset ja fyysiset ominaisuudet eroavat toisistaan ja näitä eroavaisuuksia hyödynnetään erilaisten tuotteiden valmistuksessa. Kolmen peruskategorian lisäksi materiaalien yksi kategoria on komposiitit, jotka ovat metallien, keraamien ja polymeerien epähomogeenisiä sekoituksia. (Groover, M.P., 2011, s. 6)

### **4.2.1 Polyoxymetyyleeni (POM)**

Polyoxymetyyleeni (POM) on osakiteinen kestopuovi, jonka parhaita ominaisuuksia ovat sen pieni kitkakerroin ja kulutuksenkestävyys. Lisäksi POM:lle ominaista on hyvä väsymisen-, virumisen- ja iskunkestävyys. POM:ia käytetään laajalti itsevoitelevana materiaalina monissa sovelluksissa, kuten autoissa, sähkölaitteissa ja tekniikassa. (Aikolon, 2020a; Vink, 2020; Adamiak, M., 2012, s. 10; Zackiewicz, A. et al, 2018, s. 2)

POM:lle ominaista on myös hyvä lastuavuus, ja siksi se on monen koneistajan suosiossa. Materiaalia voidaan työstää perinteisillä metallintyöstöön tarkoitetuilla koneilla ja menetelmillä. POM:ia käytetään usein metallien korvikkeena komponenteissa, joissa metallien sähkönjohtavuus aiheuttaa ongelman. (Vink, 2020; Zackiewicz, A. et al, 2018, s. 2; Zackiewicz, A. et al, 2018, s. 2)

Polyoxymetyyleenin kuivaa ja voideltua kitkakerrointa on tutkittu. Tulokset osoittavat, että voitelu ei vaikuta POM:n staattiseen kitkakertoimeen, mutta dynaaminen kitkakerroin kasvaa huomattavasti. Täten POM:ia kannattaa tavallisesti käyttää ilman voitelua. (Machado, J., 2018, s. 568)

#### **4.2.2 Akryyli (PMMA)**

Polymetyylimetakrylaatti (PMMA) eli akryyli on suulakepuristettu amorfinen kestopuovi, jolla voidaan korvata lasia. Akryyliä käytetään monissa sovelluksissa sen poikkeuksellisen hyvän läpinäkyvyyden ja keveyden vuoksi. Lisäksi akryylillä on poikkeuksellisen hyvät iskunkesto-ominaisuudet. Sen iskunkestävyys on lasiin verrattuna noin kaksikymmentä kertaa parempi. (Aikolon, 2020b; Moy, P., 2011, s. 125; Groover, M.P., 2011, s. 38)

Akryylillä on käyttökohteita monilla osa-alueilla, kuten lentokoneiden lasituksessa, kylteissä, valaistuksessa, arkkitehtuurissa ja kulkuvälineissä. Akryylistä voidaan työstää kauniita esineitä koristeeksi ja näytteille. Muita käyttökohteita ovat valotaulut ja kohteet, joissa halutaan korvata lasi. Lisäksi, koska akryyli ei ole myrkyllistä, sitä voidaan käyttää lääketieteen sovelluksissa. Akryyli on helposti lämpömuovattavissa ja sen työstetyt pinnat voidaan kiillottaa. Akryyli on erittäin säänkestävä materiaali, joten se sopii erinomaisesti ulkokäyttöön. (Adamiak, M., 2012, s. 11; Aikolon, 2020b; Groover, M.P., 2011, s. 38)

Akryylillä on kuitenkin huono kulutuksenkestävyys lasiin verrattuna, mikä heikentää sen käyttömahdollisuuksia. Akryylin naarmuuntumisen- ja kulumisenkestävyyttä on yritetty parantaa, mutta niistä on aiheutunut muita ongelmia, kuten iskunkestävyyden heikentyminen. (Adamiak, M., 2012, s. 11)

#### **4.2.3 Alumiini**

Alumiini on kevyt metalli ja siitä johtuen usein käytetty koneenrakennuksessa. Alumiinilla on hyvä sähkön- ja lämmönjohtokyky, ja sillä on myös erinomainen korroosionkestävyys sen pinnalle muodostuvan oxidikerroksen ansiosta. Alumiinin yksi merkittäviä ominaisuuksia on sen muovattavuus. Puhdas alumiini on suhteellisen heikkoa, mutta sitä voidaan seostaa ja lämpökäsitellä, jonka jälkeen se pystyy kilpailemaan joidenkin terästen kanssa. (Groover, M.P., 2011, s. 24; Valmistajat, 2020a)

Alumiini on helposti työstettävää. Sitä voidaan käsitellä laajasti kuten mm. kylmämuokata, valssata, valaa, ekstruudata ja hitsata sekä siitä voidaan valmistaa puolivalmisteita kuten levyjä, profiileja, palkkeja, lankaa, runkoja, jauhoa, tankoa ja foliota. Alumiini on tiivistä, eristävää ja sitä hyödynnetään mm. elintarvikepakkauksissa esimerkiksi alumiinifoliossa ja mehupurkeissa. (Valmistajat, 2020a)

## 5 MODULAARINEN NIVEL

Oulun yliopiston Biomimetiikka ja älykkäät järjestelmät –tutkimusyksikön mobiilirobotissa, Mörrissä, on aikaisemmin käytetty Kinovan Jaco-robottikäsivartta. Valmiin robottikäden ongelmaksi on havaittu se, että sitä ei pystytä helposti muokkaamaan käyttökohteiden muuttuessa. Tämän vuoksi Jaco-robottikäden tilalle halutaan valmistaa itse uusi robottikäsi, jonka konfiguraatiota voidaan tarvittaessa muuttaa käyttökohteeseen sopivaksi.

Robottikäden keskeiseksi osaksi suunnitellaan modulaarinen nivel, jonka toiminnallisuus ja kiinnitysmahdollisuudet mahdollistavat sen käytön robottikäden jokaisessa nivelessä. Täten nivelten sijoituksia ja varsien pituuksia muuttamalla pystytään muuttamaan robottikäden konfiguraatiota.

### 5.1 Nivelen vaatimukset

Modulaarisen nivelen suorituskykyvaatimukset haetaan suurimmaksi osaksi Kinovan Jaco-robottikädestä ja siinä käytössä olevista toimilaitteista. Tavoitteena on valmistaa nivel, jolla päästään samoihin suorituskykyihin kuin Jaco-robottikädellä.

Nivelen kiinnitykset suunnitellaan siten, että toisioakseliin kiinnitettävä käsivarsi voidaan tarvittaessa tukea myös nivelen toisella puolella sijaitsevaan vapaaseen akseliin.

Nivelen valmistuksessa pyritään käyttämään eri materiaaleja ja valmistusmenetelmiä mahdollisimman kevyen ja toimintavarman toimilaitteen valmistamiseksi.

#### 5.1.1 Suorituskyky

Taulukosta 1 nähdään, että kolmisormisen Jaco-käsivarsirobotin ulottuvuus on 0,9 m, paino on 5,2 kg, hyötykuorma täydellä ulottuvuudella on 1,3 kg ja robotin työkalupisteen maksimi lineaarinen nopeus on 0,2 m/s.

**Taulukko 1.** Kinovan Jaco-robottikäden suorituskyky (Kinova, 2018).

KINOVA JACO-robottikäsi	3-sorminen robotti
Paino	5,2 kg
Hyötykuorma (jatkuva keskialueen ulottumalla)	1,6 kg
Hyötykuorma (hetkellinen maksimi ulottumalla)	1,3 kg
Ulottuma	0,9 m
Materiaali	Hiilikuitu, alumiini
Maksimi lineaarinen nopeus	0,2 m/s
Käyttöjännite (tasavirta)	18–29 V
Keskimääräinen tehonkäyttö	25 W
Maksimi tehonkäyttö	100 W

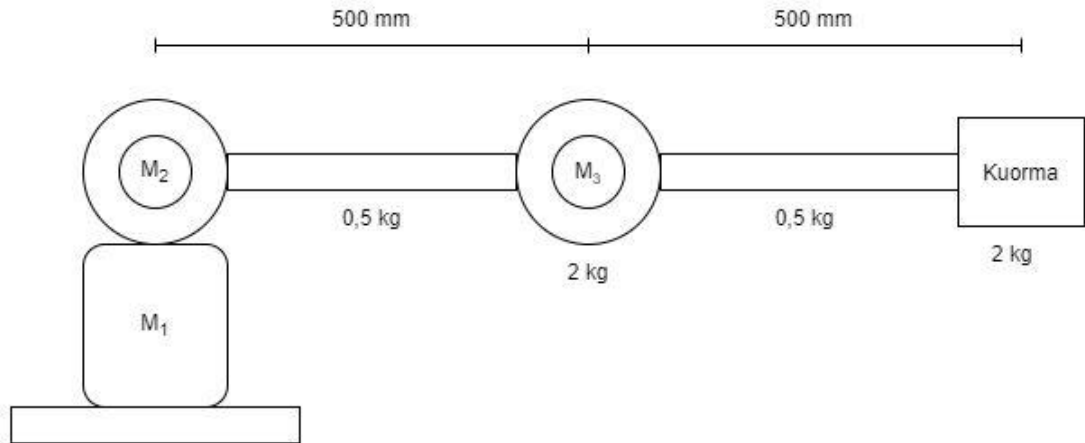
Jaco-robottikädessä on käytetty Kinovan kahta eri modulaarista toimilaitetta: KA-75+ ja KA-58. Taulukosta 2 nähdään Jaco-robottikäden toimilaitteiden ominaisuuksia. Jaco-robottikäden suurimmissa nivelissä käytettyjen KA-75+-toimilaitteiden maksimi vääntömomentti on 30,5 Nm huippunopeus on 12,2 rpm. Jaco-robottikäden toimilaitteissa on käytetty harmonisia vaihteita.

**Taulukko 2.** Kinovan Jaco-robottikäden toimilaitteiden KA-75+ ja KA-58 ominaisuudet (Kinova, 2018).

Toimilaite	KA-75+	KA-58
Nimellisvääntömomentti	12,0 Nm	3,6 Nm
Maksimi vääntömomentti	30,5 Nm	6,8 Nm
Nimellispyörimisnopeus	9,4 rpm	15,0 rpm
Kuormittamaton pyörimisnopeus	12,2 rpm	20,3 rpm
Maksimi moottorin hyötysuhde	83 %	81 %
Maksimi vaihteen hyötysuhde	76 %	69 %
Takaisinajon vääntömomentti	1,7–5,2 Nm	0,8–7 Nm

Näiden Kinovan Jaco-robottikädestä saatujen tietojen pohjalta lähdetään määrittämään modulaarisen nivelen toimilaitteelta tarvittavaa vääntömomenttia ja pyörimisnopeutta. Kuvassa 6 on hahmoteltu robotin osien mahdolliset painot ja sijainnit. Ensimmäisen nivelen toimilaitteen ei tarvitse kannatella käsivarren osien painoa, joten suurin kannateltava kuorma kohdistuu toiseen niveleen, kun robottikäsi on ojennettuna suoraksi.

Kolmannen nivelen toimilaitteelle jää ranteen kannattelu. Koska samaa modulaarista niveltä on tarkoitus käyttää robotin kaikissa nivelissä, nivelen toimilaitteelta vaadittava vääntömomentti mitoitetaan robottikäden toisen nivelen mukaan.



**Kuva 6.** Hahmotelma robottikädestä vaaka-asennossa, sen nivelten ja kuorman sijainneista ja sen osien mahdollisista painoista.

Toisen nivelen toimilaitteelta vaadittu vääntömomentti on kuvan 6 arvoilla laskettuna:

$$M_2 = (0,5 \text{ kg} \cdot 0,25 \text{ m} + 2 \text{ kg} \cdot 0,5 \text{ m} + 0,5 \text{ kg} \cdot 0,75 \text{ m} + 2 \text{ kg} \cdot 1 \text{ m}) \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$M_2 \approx 35 \text{ Nm}$$

Modulaariselta nivelen toimilaitteelta vaaditaan siis vähintään 35 Nm maksimi vääntömomentti, jotta se jaksaa pitää robottikäden suorassa.

Lopullisen maksimi vääntömomentin tulee olla kuitenkin pienimmillään hieman suurempi kuin 35 Nm, jotta toimilaite jaksaa liikuttaa käsivarren tämän pisteen ohi. Toimilaitteen pyörimisnopeusvaatimus tulee suoraan Jaco-robottikäden KA-75+-toimilaitteen pyörimisnopeudesta, joten toimilaitteen pyörimisnopeuden on oltava vähintään 12 rpm. Jaco-robottikädellä on melko pieni käyttöteho 100 W, mikä on hyödyllistä mobiilirobottien tapauksessa, kun virtalähteenä käytetään tavallisesti akkuja. Modulaarisen nivelen toimilaitteelle ei kuitenkaan aseteta tehovaatimusta, koska



robottikäyttöä on tarkoitus käyttää lyhyitä aikoja kerrallaan ja suurimman osan ajasta se voi olla lepotilassa.

### 5.1.2 Paino ja dimensiot

Markkinoilta etsitään robottikäsitelmissä käytettäväksi suunniteltuja modulaarisia niveliä, jotka täyttävät suunniteltavan nivelen suorituskykyvaatimukset. Näiden modulaaristen nivelten pohjalta halutaan mitoittaa valmistettavan toimilaitteen paino ja dimensiot.

Taulukossa 3 näkyy neljä kaupallista robotteihin tarkoitettua modulaarista niveltä. Yhdessä modulaarisessa nivelessä käytetään sarjassa joustavaa toimilaitetta (SEA) ja kolmessa käytetään hammasvaihteilla alennettua toimilaitetta. Modular Joint T9.4 -nivelessä on muista modulaarisista nivelistä poiketen kaksi vapaussuuntaa. Nivelten maksimi vääntömomentti vaihtelee välillä 34–67 Nm. Yksittäiset nivelet ovat keskimäärin kilon painoisia ja akselin suuntaisesti halkaisijaltaan noin 100 mm.

**Taulukko 3.** Vertailu markkinoilta löytyvistä modulaarisista nivelistä (Servosila, 2019; Anybotics, 2019; Acutronic Robotics, 2019; Aubo Robotics, 2019).

Nivelmoduuli	Servo Drive 56Nm	ANYdrive	Modular Joint T9.4	MRJ090A-II
Valmistaja	Servosila	Anybotics	Acutronic robotics	Aubo robotcs
Toimilaitetyyppi	Hammasvaihte	SEA	Hammasvaihte	Hammasvaihte
Vapausteiden määrä	1	1	2	1
Paino	1000 g	1090 g	2800 g	927 g
Maksimi vääntömomentti	56 Nm	40 Nm	34 Nm	67 Nm
Nimellisvääntömomentti		15 Nm	9,4 Nm	16 Nm
Dimensiot	157x83x64 mm	Ø90x95 mm	88x192x192 mm	
Pyörimisnopeus	90 rpm	114 rpm	15 rpm	12,5 rpm
Tarkkuus (hukkaliike)	< 0,2°	< 0,025°	< 0,006°	< 0,5°
Käyttöjännite	24 V	48 V	48 V	24 V
Maksimi teho		720 W		
Nimellisteho		240 W		
Tehonkäyttö	32 W		< 200 W	
Suojaustaso	IP68	IP67	IP54	
Kommunikaatio	CAN	EtherCAT, ROS	Gigabit Ethernet	CAN

Markkinoilta löytyviin modulaarisiin niveliin verraten valmistettavan nivelen tavoitepainoksi asetetaan noin 1 kg ja nivelen dimensioiden tavoitteeksi asetetaan noin 100 mm halkaisija ja 100 mm pituus.

## 5.2 Toimilaitevalinta

Modulaariseen niveleen tarvitaan toimilaitte, jolla saavutetaan vähintään 35 Nm vääntömomentti ja 12 rpm pyörimisnopeus. Nivelen toimilaitteelle ei aseteta tehovaatimusta, koska käyttökohteessa robottikäsi voi olla suurimman osan ajasta lepotilassa. Toimilaitte valitaan huomioiden modulaarisen nivelen tavoitepaino 1 kg, ja tavoitedimensiot 100 mm halkaisija ja 100 mm pituus.

### 5.2.1 Toimilaitetyypin valinta

Toimilaitetyypin valinnassa joudutaan huomioimaan toimilaitteen suorituskykyvaatimukset ja käyttökohde.

Pneumaattiset toimilaitteet ovat varsinkin robottien tarttujissa paljon käytettyjä, mutta pyörimisliikkeen aikaansaaminen vaatii tavallisesti hammasvaihteen, joka muuttaa sylinterin lineaarisen liikkeen toisioakselin pyörimisliikkeeksi. Pneumaattiset toimilaitteet ovat tunnetusti myös huonoja sovelluksissa, joissa tarvitaan suurta voimaa tai vääntöä, joten 35 Nm vääntömomentti vaikuttaa liian suurelta pneumaattiselle toimilaitteelle. Pneumaattisilla toimilaitteilla paikoitustarkkuus tuottaa myöskin ongelmia, sillä niitä ohjataan tavallisesti fyysisestä rajasta toiseen.

Hydraulisella toimilaitteella päästäisiin varmasti tavoiteltuun vääntömomenttiin, sillä niitä käytetään tunnetusti teollisuudessa suuria voimia tarvitsevista käyttökohteista. Hydraulinen toimilaitte tarvitsee kuitenkin paljon ohjeislaitteita toimintaa varten ja nämä ohjeislaitteet vaativat paljon tilaa ja painavat paljon. Ylimääräinen paino laskee mobiilirobotin hyötykuormaa, joten sitä halutaan välttää. Hydrauliikan haittapuolena ovat myös mahdolliset vuodot, jolloin mobiilirobotin laitteisto pitäisi suojata tavallista paremmin.

Sähkömagneettiset toimilaitteet ovat paljon käytettyjä robotiikan sovelluksissa ja niiden käyttö on jatkuvasti lisääntynyt niiden kehityksen myötä. Varsinkin servomoottorit ovat yleisessä käytössä teollisuusroboteissa niiden suurien nopeuksien ja hyvän

paikoitustarkkuuden vuoksi. Sähkömagneettisten toimilaitteiden haittapuolena on kuitenkin se, että niistä saadaan tavallisesti melko vähän vääntömomenttia ja suurin teho saavutetaan suurilla pyörimisnopeuksilla, jotka ovat tavallisesti 2000–4000 rpm luokkaa. Suunniteltavan modulaarisen nivelen tapauksessa sähkömagneettisen toimilaitteen kanssa tarvitaan vaihde, jotta vääntömomentti ja pyörimisnopeus saadaan käyttökohteeseen sopivalle alueelle.

Modulaarisen nivelen voimanlähteenä päätetään käyttää sähkömagneettista toimilaitetta, koska pneumaattinen ja hydraulinen toimilaite eivät vaikuta käyttökohteeseen sopivilta vaihtoehdoilta. Modulaarisen nivelen tavoitepaino ja tavoitedimensiot rajoittavat sähkömagneettisen toimilaitteen valintaa ja riittävän pienet sähkömagneettiset toimilaitteet eivät suoravedolla riitä niveleltä vaadittavaan 35 Nm vääntömomenttiin. Nivelen toimilaitteessa on tästä johtuen käytettävä alennusvaihdetta.

### 5.2.2 Sähkömoottorin valinta

Mobiilirobottiin tulevan modulaarisen nivelen kannalta on tärkeää saavuttaa mahdollisimman hyvä vääntömomenttitiheys, jotta nivelistä valmistettavan käsivarren hyötykuorma pysyisi mahdollisimman suurena. Vääntömomenttitiheys paranee sähkömoottoreissa, kun roottorin magneettien etäisyyttä keskipisteestä kasvatetaan.

Jalallisissa roboteissa kuten Ghost Robotics:n Minitaur-robotissa ja MIT:n Mini Cheetah-robotissa on käytetty tavallisesti droneissa käytettäviä sähkömoottoreita, sillä ne soveltuvat hyvin robotiikkaan pienen kokonsa ja suuren magneettien välisen etäisyyden vuoksi.

Mahdollisimman hyvän vääntömomenttitiheyden saavuttamiseksi sopivaa sähkömoottoria etsitään T-Motor:n raskaan luokan droneissa käytettävien sähkömoottorien joukosta. Sähkömoottorilta toivottuja ominaisuuksia ovat pieni nopeusvakio, pieni koko, suuri vääntömomentti ja hyvä vääntömomenttitiheys.

Taulukossa 4 nähdään neljä T-Motor:n isoissa droneissa käytettävää sähkömoottoria. Valmistaja on testiraporteissa antanut vääntömomentit tilanteessa, jossa sähkömoottoria kuormitetaan potkurilla. U12-sarjan sähkömoottorilla on muihin verrattuna huomattavasti suurempi vääntömomentti ja paras vääntömomenttitiheys, mutta sen paino 778 g on lähes 80 % nivelen tavoitepainosta, joten sitä ei voida käyttää modulaarisessa

nivelessä. Sähkömoottorien tapauksessa suuri virta tarkoittaa myös kovaa lämpenemistä, eikä tässä käyttökohteessa ole potkurin ilmapirta jäähdyttämässä sähkömoottoria.

**Taulukko 4.** Sähkömoottorien ominaisuuksien vertailu (T-Motor, 2018a; T-Motor, 2018b; T-Motor, 2018c; T-Motor, 2018d).

Sähkömoottori	U8 II	U10 II	U12 II	U8 Lite
Nopeusvakio	KV 85	KV 100	KV 120	KV 85
Dimensiot	Ø87x27 mm	Ø99x33 mm	Ø107x48 mm	Ø87x27 mm
Paino	277 g	415 g	778 g	243 g
Max jatkuva virta (180 s)	19,1 A	32,4 A	95 A	19,1 A
Max jatkuva teho (180 s)	917 W	1600 W	4560 W	917 W
Nimellisjännite (Lipo)	48 V	48 V	48 V	48 V
Vääntömomentti (potkuri G28x9,2CF)	1,80 Nm (16,5 A)	2,62 Nm (24,2 A)	7,9 Nm (94,3 A)	1,80 Nm (16,5 A)
Vääntömomenttitiheys	6,5 Nm/kg	6,3 Nm/kg	10,2 Nm/kg	7,4 Nm/kg

Modulaarisessa nivelessä käytettäväksi sähkömoottoriksi valitaan U8 Lite KV85 (kuva 7). U8 Lite -sähkömoottori soveltuu painoltaan 243 g ja vääntömomenttitiheydeltään 7,4 Nm/kg parhaiten tähän käyttötarkoitukseen. U8 Lite -sähkömoottori sopii myös dimensioiltaan modulaarisen nivelen tavoitteisiin, sillä sen ulkohalkaisija on alle 100 mm ja pituus on vain 27 mm.



**Kuva 7.** T-Motor U8 Lite -sähkömoottori ja sen ominaisuudet (T-Motor, 2018a)(julkaistaan T-Motor:n luvalla).

Toimilaitteeseen valitun U8 Lite -sähkömoottorin testiraporttiin perustuvasta taulukosta 5 nähdään, että moottori pystyy tuottamaan ainakin 1,8 Nm vääntömomentin 3200 rpm pyörimisnopeudella, kun kuormana on potkuri. Valmistaja ei ole antanut sähkömoottorin maksimi vääntömomenttia, mutta sähkömoottoreilla se on tavallisesti moninkertainen suurilla pyörimisnopeuksilla saatavaan vääntömomenttiin verrattuna.

**Taulukko 5.** U8 Lite KV85 –sähkömoottorin testiraportin mukaiset vääntömomentit eri pyörimisnopeuksilla ja virroilla (T-Motor, 2018a).

Käyttöjännite	Potkuri	Virta	Pyörimisnopeus	Vääntömomentti	Lämpötila
48 V	T-Motor G28x9,2CF	1,8 A	1584 rpm	0,45 Nm	88 °C
		3,2 A	1872 rpm	0,66 Nm	
		5,1 A	2190 rpm	0,90 Nm	
		7,1 A	2439 rpm	1,08 Nm	
		9,5 A	2680 rpm	1,28 Nm	
		12,2 A	2917 rpm	1,47 Nm	
		16,5 A	3200 rpm	1,80 Nm	

Kun sähkömoottorin jatkuva vääntömomentti on 1,8 Nm, 35 Nm jatkuvan vääntömomentin aikaansaamiseksi vaihteelta tarvittava välityssuhde on:

$$i = \frac{35 \text{ Nm}}{1,8 \text{ Nm}} \approx 19,4$$

U8 Lite –sähkömoottorin kanssa modulaariseen niveleen tarvitaan täten vähintään 19,4 välityssuhteen alennusvaihde.

### 5.2.3 Alennusvaihde

Mobiilirobottien käsivarsissa tulee ottaa huomioon se, että mobiilirobotin ympäristöstä ei voida olla täysin varmoja. Tämän vuoksi mobiilirobotissa käytettävän robottikäden tulisi kestää mahdolliset törmäykset. Nivelten toimilaitteiden kannalta tämä tarkoittaa sitä, että toimilaitteen tulee olla helposti takaisinajettava (”backdrivable”), eli ulkoisen voiman pitää pystyä helposti liikuttamaan niveliä törmäystilanteessa. Tämä ”joustaminen” vähentää riskiä sille, että törmäyksen kohde tai käsivarsi itse vaurioituu.

Normaalisti robottikäsissä käytetään suuren välityssuhteen alennusvaihteita, koska niillä saavutetaan suuri vääntömomentti, hyvä paikoitustarkkuus ja sähkömoottoria voidaan ajaa pienemmällä virralla. Suuri välityssuhde kuitenkin heikentää toimilaitteen takaisinajettavuutta, mikä ei ole mobiilirobottiin valmistettavan nivelen kannalta haluttavaa. Tästä johtuen toimilaitteeseen yritetään löytää mahdollisimman pienen välityssuhteen alennusvaihte, jolla kuitenkin saavutetaan niveleltä vaadittava 35 Nm vääntömomentti.

Markkinoilta etsitään mahdollisimman pienikokoisia alennusvaihteita, jotka sopivat U8 Lite –sähkömoottorin pyörimisnopeusalueelle. Etsinnässä suositaan harmonisia ja sykloidisia vaihteita, sillä niillä on tavallisesti hyvin pieni välitys. Pieni välitys on tärkeä robotin paikoitustarkkuuden vuoksi.

Taulukossa 6 on listattu kahdelta valmistajalta löytyneet alennusvaihteet, jotka täyttävät pyörimisnopeus- ja kokovaatimukset. Harmonic Drive:n harmoniset vaihteet sopisivat käyttötarkoitukseen kokonsa ja painonsa puolesta, mutta niiden maksimi vääntömomentti on liian pieni käyttötarkoitusta ajatellen. SPINEA:n sykloidiset vaihteet ovat halkaisijaltaan pienikokoisia, mutta niiden pituudet käyttäisivät 40-60 % toimilaitteen tavoitellusta pituudesta. SPINEA:n vaihteiden vääntömomentit riittäisivät niveleen, mutta niiden paino kasvaa modulaarisen nivelen tavoitepainoon nähden liian suureksi.

**Taulukko 6.** Markkinoilta löytyvät käyttötarkoitukseen sopivimmat alennusvaihteet (Harmonic Drive, 2019a; Harmonic Drive, 2019b; Diequa, 2019a; Diequa, 2019b).

Valmistaja	Harmonic Drive		SPINEA	
Malli	FB-2 20	FR-2 20	TS 50-M	TS 60-T
Vaihteen tyyppi	Harmoninen vaihde		Sykloidinen vaihde	
Koko	Ø70x14 mm	Ø70x25 mm	Ø47x41 mm	Ø63x40 mm
Paino	300 g	500 g	470 g	860 g
Välityssuhde	50	50	47	35
Nimellisvääntömomentti	14 Nm	25 Nm	18 Nm	37 Nm
Maksimi vääntömomentti	18 Nm	34 Nm	36 Nm	74 Nm
Nimellipyörimisnopeus	2000 rpm	2000 rpm	2000 rpm	2000 rpm
Maksimi pyörimisnopeus	3600 rpm	3600 rpm	5000 rpm	4000 rpm

Kaupalliset alennusvaihteet eivät sovi modulaarisessa nivelessä U8 Lite –sähkömoottorin kanssa käytettäväksi alennusvaihteeksi niiden painon tai pienen vääntömomentin vuoksi. Tästä johtuen alennusvaihteen valmistusta päätetään kokeilla itse.

### **5.3 Itse valmistettava alennusvaihte**

Paul Gould ja Haddington Dynamics ovat näyttäneet, että jopa 3D-tulostamalla on mahdollista valmistaa toimivia alennusvaihteita robotiikan sovelluksiin. Tämän vuoksi modulaarisen nivelen alennusvaihteessa halutaan myös kokeilla eri materiaalivaihtoehtoja ja valmistusmenetelmiä.

Ensimmäiseksi päätetään minkä tyyppin vaihte nivelen halutaan valmistaa. Vaihtoehtoina ovat ensisijaisesti planeettavaihte, sykloidinen vaihte ja harmoninen vaihte, koska niitä käytetään paljon teollisuudessa ja robotiikassa. Nivelen kannalta näiden kolmen vaihtetyypin etuna on myös se, että ne kuuluvat koaksiaalisiin vaihteisiin eli niiden ensiö- ja toisioakseli ovat linjassa.

Sykloidisen vaihteen ja planeettavaihteen osien geometriat sopivat harmonista vaihdetta paremmin 3D-tulostukseen ja laserleikkaukseen. Harmonisen vaihteen valmistuksen kannalta haastavimpana osana on sen joustava hammaspyörä. Planeettavaihteen hammaspyörien hampaat eivät todennäköisesti kestäisi niveleltä vaadittavaa vääntömomenttia, joten nivelen alennusvaihteeksi päätetään valmistaa sykloidinen vaihte. Sykloidisessa vaihteessa sykloidilevyyn kohdistuvat voimat jakautuvat teoriassa hyvin suurelle pinta-alalle, joten heikompienkin materiaalien käyttö vaikuttaa mahdolliselta.

#### **5.3.1 Alennusvaihteen materiaalivalinnat ja valmistusmenetelmät**

Modulaarisen nivelen komponenttien valmistuksessa pyritään käyttämään eri materiaaleja ja valmistusmenetelmiä, jotta nivelen paino saadaan pidettyä tavoitteessa. Sykloidisen vaihteen kannalta tavoitteena on käyttää lujempia ja usein myös tiheämpiä materiaaleja toiminnan kannalta kriittisten osien valmistukseen ja kevyitä materiaaleja aina kun mahdollista.

Osien valmistukseen on käytettävissä 3D-tulostimia, Roland SRM-20 -kaiverruskone, Fab Lab:n Epiloq Laser Fusion -laserleikkuri ja Oulun yliopiston pajan työstökoneet, joista tärkeimpänä CNC-jyrsin.

Taulukossa 7 näkyy alennusvaihteessa käytettäväksi suunniteltujen materiaalien ominaisuuksia. Terästä ei haluta käyttää sen suuren tiheyden vuoksi.

**Taulukko 7.** Materiaalien ominaisuuksia (Aikolon, 2020a; Aikolon, 2020b; The World Material, 2020).

Materiaali	Akryyli (PMMA)	POM	PLA	Alumiini
Tiheys	1,18 g/cm <sup>3</sup>	1,41 g/cm <sup>3</sup>	1,00 g/cm <sup>3</sup>	2,7 g/cm <sup>3</sup>
Sulamispiste	70 °C	140 °C	210 °C	580–650 °C
Lämmönjohtavuus	0,18 W/(K·m)	0,39 W/(K·m)		167 W/(K·m)
Vetolujuus	70 MPa	67 Mpa		310 MPa
Taivutuslujuus	115 MPa	91 Mpa		
Myötölujuus				275 MPa
Puristuslujuus 1%/2%		20/35 Mpa		
Valmistus	Laserleikkaus, Jyrsintä	Laserleikkaus, Jyrsintä	3D-tulostus	Jyrsintä

Akryyli on yhtenä vaihtoehtona sen läpinäkyvyyden vuoksi. Läpinäkyvät osat mahdollistavat liikkuvien komponenttien näkemisen toiminnan aikana, mikä on visuaalisesti miellyttävä ominaisuus ja helpottaa mahdollisten vikatiilojen havaitsemista. Akryyliä voidaan nopeasti leikata haluttuun muotoon laserleikkurilla. Lisäksi akryyliä voidaan työstää Roland SRM-20-kaiverruskoneella, jos haluttujen kappaleiden valmistus ei ole mahdollista laserleikkurilla.

POM-muovi on kulutuksenkestävyyden ja pienen kitkakertoimen vuoksi paljon käytetty mekaniikassa mm. liukupinnoilla. Sitä käytetään myös metallien korvikkeena käyttökohteissa, joissa metallien sähkönjohtavuus aiheuttaa ongelmia. POM-muovisten osien valmistukseen voidaan käyttää laserleikkuria ja Roland SRM-20-kaiverruskonetta. POM-muovi on akryyliä huomattavasti kalliimpaa.

3D-muovin ominaisuudet vaihtelevat paljon käytettävästä muovista ja 3D-tulostimesta riippuen. Paul Gould ja Haddington Dynamics ovat kuitenkin osoittaneet, että 3D-tulostamalla on mahdollista valmistaa robotiikkaan soveltuvia alennusvaihteita. 3D-



tulostamalla saadaan helposti valmistettua kevyitä kappaleita ja monimutkaisempiakin muotoja.

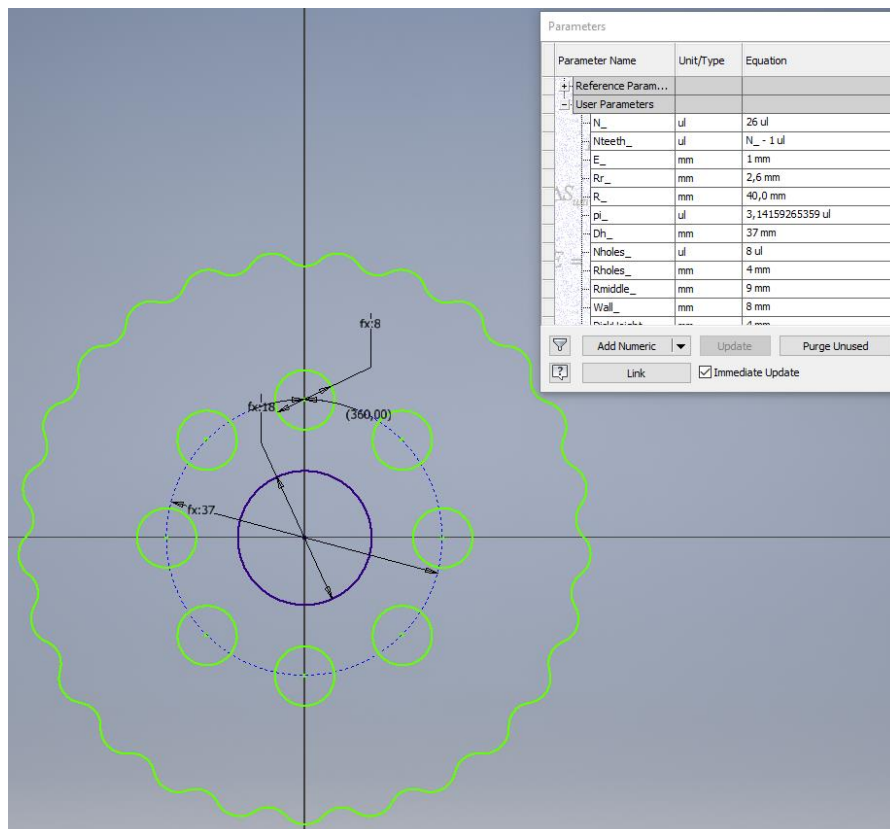
Alumiini on metalleista toimilaitteeseen sopivin vaihtoehto. Alumiini on kevyt metalli ja sen lujuusominaisuuksien pitäisi riittää sykloidisen vaihteen komponentteihin. Yhtenä alumiinin parhaimpana ominaisuutena on myös sen hyvä lämmönjohtavuus. Alumiini on kuitenkin suhteellisen kallista ja sen työstöön tarvitaan tässä tapauksessa Oulun yliopiston pajan CNC-jyrsintä.

### **5.3.2 Alennusvaihteen 3D-mallinnus**

Tavoitteena on suunnitella niveleen valitun U8 Lite -sähkömoottorin ulkohalkaisijaan sopiva vaihde mahdollisimman pienellä pituudella ja painolla, jotta nivelen tavoite koko ja mahdollisimman hyvä vääntömomenttitiheys saavutetaan.

Sykloidisen vaihteen kehäpyörän rullat voidaan laakeroida tai ne voidaan integroida kehäpyörän muotoon. Valmistuksen helpottamiseksi ja vaihteeseen tarvittavien komponenttien määrän pienentämiseksi kehäpyörän rullat integroidaan kehäpyörän muotoon.

Sykloidisen vaihteen tärkeimmät komponentit ovat sykloidilevyt, joita ensiöakselin epäkeskot liikuttavat kehäpyörän rullia pitkin. Sykloidilevyn geometria muodostetaan kaavalla (5) käyttäen Inventor:n ”2D Equation Curve” -ominaisuutta. Inventor:lla tehty sykloidilevyn parametrisoitu malli näkyy kuvassa 8.



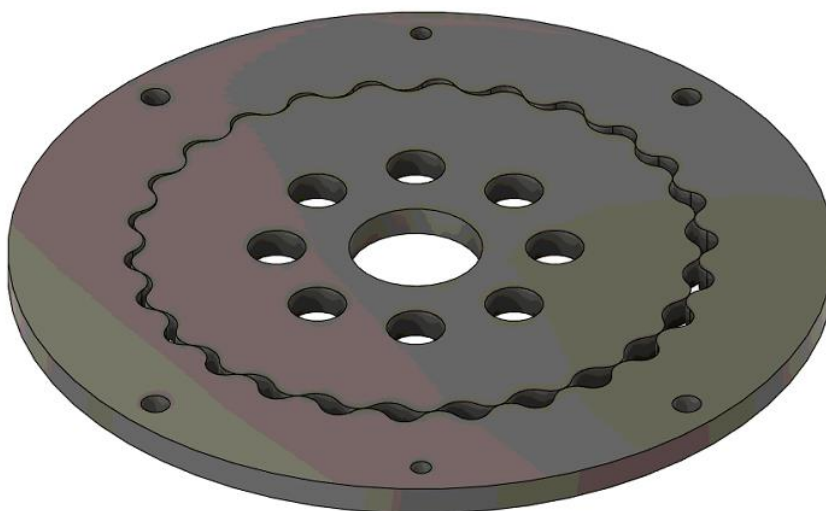
**Kuva 8.** Inventor:lla mallinnettu ja parametrisoitu sykloidilevy.

Kuvassa 9 näkyvä ensimmäinen toimiva prototyyppi on koottu laserleikkaamalla levyistä valmistetuista kehäpyörästä ja sykloidilevyistä, ja 3D-tulostetuista ensiö- ja toisioakselista. Prototyyppivaihe on toiminut porakoneella pyöritettynä kuormittamattomana pitkään. 3D-tulostetut osat ovat kuitenkin hajonneet, kun vaihdetta on kuormitettu käsin. Tästä johtuen 3D-tulostaminen jätetään vaihteen osien valmistuksessa pois ja vaihteen osien valmistuksessa keskitytään laserleikkaukseen.



**Kuva 9.** Ensimmäinen prototyyppi itse valmistetusta sykloidisesta vaihteesta.

Laserleikkausta ajatellen vaihde halutaan 3D-mallintaa levyistä kasattavana kokonaisuutena. Kuvassa 10 näkyy mallinnettuna sykloidilevy ja sitä vastaava kehäpyörän levyosa. Sykloidisia vaihteita valmistetaan tavallisesti kahdella 180 asteen tai kolmella 120 asteen vaihdesiirrossa olevalla sykloidilevyllä värähtelyjen vähentämiseksi. Mahdollisimman pienen koon saavuttamiseksi sykloidilevyjä tulee vaihteeseen kaksi kappaletta 180 asteen vaihesiirrolla.



**Kuva 10.** Syklodilevy ja kehäpyörä.

Aikaisemmin on selvitetty, että vaihteelta vaaditaan vähintään 19,4 välityssuhde, jotta suorituskyykyvaatimusten mukainen vääntömomentti saavutetaan. Välityssuhde yritetään pitää mahdollisimman pienenä, jotta toimilaitteen takaisinajettavuus pysyisi hyvänä. Syklodisen vaihteen välityssuhteeksi valitaan siis 25, jonka pitäisi aikaisempien perusteluiden mukaisesti riittää U8 Lite –sähkömoottorin kanssa tavoiteltavan vääntömomentin saavuttamiseen pienellä varmuuskertoimella. Syklodilevyn nokkien lukumäärä on täten kaavan (3) mukaisesti 25.

Toisioakselin rullat korvataan tapeilla ja niiden laakerointi toteutetaan syklodilevyn puolella. Toisioakselin tappien lukumääräksi valitaan kahdeksan, koska sen uskotaan riittävän toisioakselille välitettävän vääntömomentin jakamiseen.

Syklodilevyn reikien suuruudet määräytyvät tässä tapauksessa markkinoilta löytyvien kuulalaakerien kokojen perusteella. Vaihteeseen etsitään mahdollisimman ohuita laakereita, jotta syklodilevyn paksuus saadaan myös pienemmäksi. Keskellä oleva epäkesko laakeroidaan 12x18x4 mm kuulalaakerilla ja toisioakselin tapit laakeroidaan 5x8x2,5 mm kuulalaakereilla.

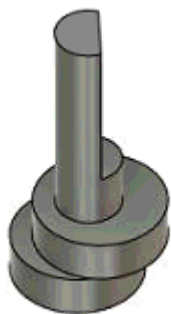
Syklodisen vaihteen epäkeskeisyyttä rajoittaa kaava (6). Jos epäkeskeisyys on liian pieni, syklodilevy saattaa pyörähtää kehäpyörän rullan ohitse, jolloin se ei välitä voimaa toisioakselille. Taulukossa 8 näkyy syklodisen vaihteen valmistukseen valitut parametrit.

Valituilla parametreilla sykloidilevylle suurin mahdollinen epäkeskeisyys on noin 1,5 mm. Sykloidilevylle valitaan pienellä varmuuskertoimella epäkeskeisyydeksi 1 mm. Toisioakselin tappien halkaisija johdetaan kaavalla (7) niitä pyörittävien laakerien sisähalkaisijasta 5 mm ja epäkeskon epäkeskeisyydestä 1 mm. Täten toisioakselin tappien halkaisijaksi tulee 3 mm.

**Taulukko 8.** Valmistettavan sykloidisen vaihteen parametrit.

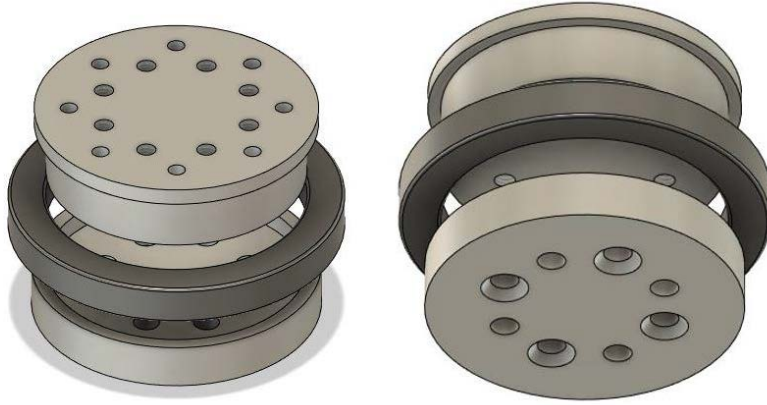
Parametri	Koko
Välityssuhde	25
Sykloidilevyn nokkien lukumäärä	25 kpl
Sykloidilevyn toisioakselin tappejä pyörittävien reikien halkaisija	8 mm
Sykloidilevyn keskireiän halkaisija	18 mm
Kehäpyörän tappien lukumäärä	26 kpl
Kehäpyörän tappikehän halkaisija	80 mm
Kehäpyörän tappien halkaisija	6 mm
Toisioakselin tappien lukumäärä	8 kpl
Toisioakselin tappikehän halkaisija	37 mm
Toisioakselin tappien halkaisija	3 mm
Suurin mahdollinen epäkeskeisyys	1,5385 mm
Valittu epäkeskeisyys	1 mm

Koska sykloidilevyjä tulee vaihteeseen kaksi kappaletta 180 asteen vaihesiirrolla, epäkeskeisen ensiöakselin valmistaminen yhtenä kappaleena on hyvin vaikeaa. Sykloidilevyjä ohjaava epäkeskeinen ensiöakseli valmistetaan tästä johtuen erikseen pienestä D-akselista ja kahdesta epäkeskosta levystä, jotka tulevat D-akselille (kuva 11).



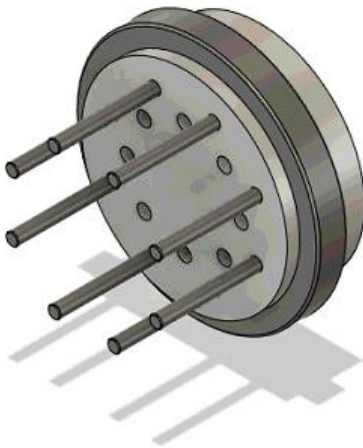
**Kuva 11.** Epäkeskot kiinni ensiöakselissa.

Toisioakseli valmistetaan kahdesta osasta, jotka kiristetään 45x58x7 mm kuulalaakeria vasten M4-pulteilla. Kuvasta 12 katsottuna ylempi toisioakselin osa asennetaan laakerin sisäkehälle ja alempi toisioakselin osa puristaa pulteilla koko toisioakselin laakeriin kiinni.



**Kuva 12.** Räjätyskuva sykloidisen vaihteen toisioakselista.

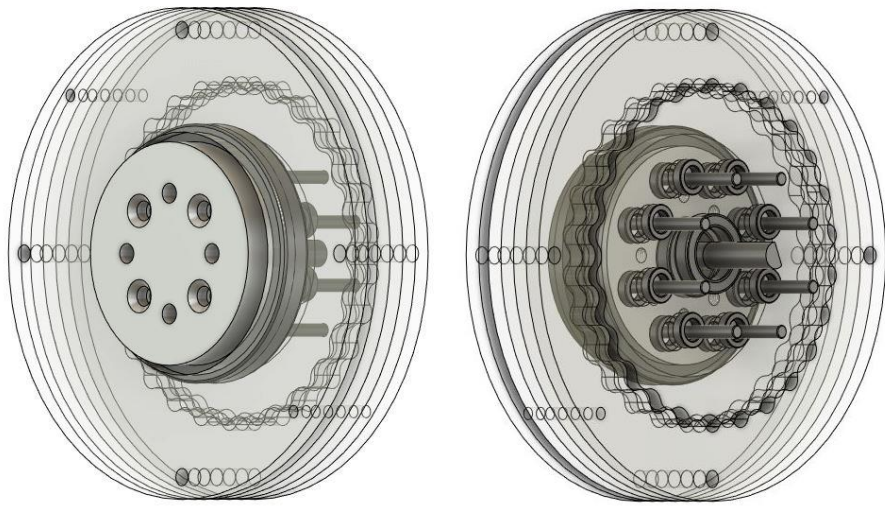
Kuvassa 13 nähdään toisioakselille asennettuna 3 mm halkaisijaltaan olevat toisioakselin tapit, joita sykloidilevyt työntävät liikkeelle kehäpyörää pitkin vaeltaessaan.



**Kuva 13.** Toisioakselin tapit asennettuna toisioakselille.

Kuvassa 14 nähdään koko sykloidisen vaihteen 3D-malli laserleikatuista akryylilevyistä koottuna. Laserleikattua vaihdetta on testattu porakoneella ensioakselilta pyörittämällä ja

kuormittamattomana vaihde on toiminut hyvin. Vaihdetta on myös helppo pyörittää toisioakselin puolelta, joten se vaikuttaa helposti takaisinajettavalta. Laakerit eivät ole kuitenkaan pitkällä käytöllä pysyneet paikallaan laserleikatuilla pinnoilla, vaikka erilaisia ahdistussovitteita on kokeiltu laserleikkauksen nopeuden ansiosta. Näiden tulosten pohjalta vaihteen toiminnan kannalta tärkeimpiä osia kokeillaan valmistaa jyrsimällä.

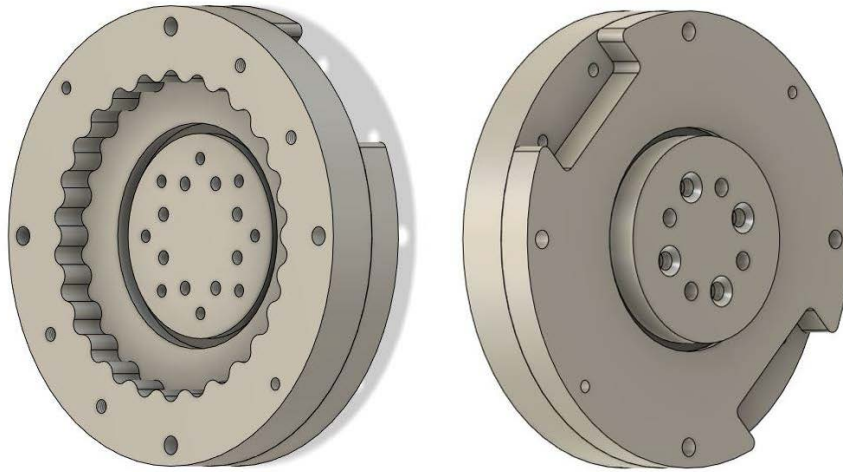


**Kuva 14.** Syklodisen vaihteen toiminnallinen kokonaisuus mallinnettuna akryylilevyistä koottuna.

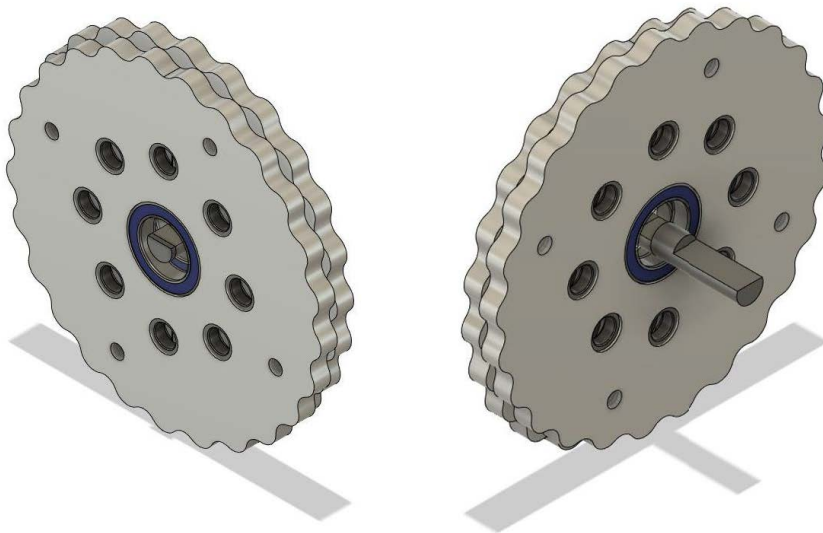
Jyrsittävän syklodisen vaihteen valmistuksessa ei ole levyistä kokoamisen rajoitusta vaan kehäpyörä pystytään valmistamaan yhtenä osana. Kuvan 15 mukaisesti kehäpyörä on mallinnettu yhtenä osana ja tämän lisäksi toisioakselin laakerille voidaan tehdä laakeripesä vaihteen ”päätypalaan”, jolloin se saadaan tuettua paremmin. Lisäksi syklodilevyyn pystytään tekemään toisioakselin tappien laakereille laakeripesät aikaisemman laakerien irtoamisen korjaamiseksi. Kuvassa 16 näkyy alumiinista mallinnetut syklodilevyt ensioakselin epäkeskojen kanssa mallinnettuna.

Syklodisesta vaihteesta päätetään valmistaa jyrsimällä kolme eri versiota, joissa kehäpyörä ja syklodilevyt on valmistettu akryylista, POM:sta ja alumiinista.





**Kuva 15.** Alumiinista mallinnetun vaihteen kehäpyörä ja toisioakselin tuenta.



**Kuva 16.** Alumiinista mallinnetut syklodilevyt asennettuna ensiöakseliin.

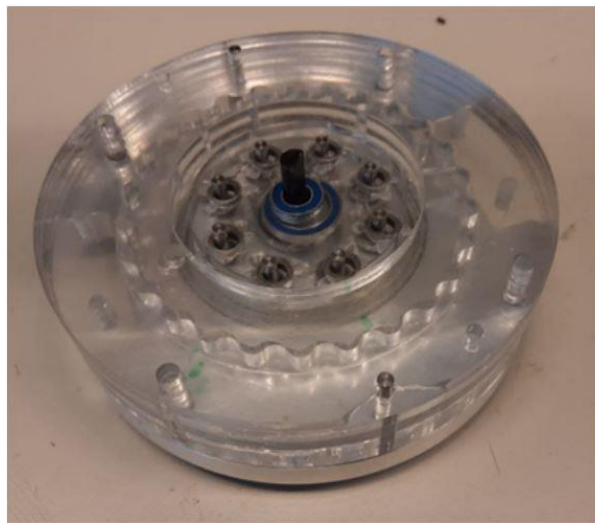
### 5.3.3 Akryylista valmistettu syklodinen vaihde

Kuvassa 17 näkyy syklodinen vaihde pääosin akryylista valmistettuna. Akryyli on valittu yhdeksi valmistusmateriaaliksi pääosin se näyttävyyden vuoksi, mutta samalla halutaan testata kuinka hyvään suorituskyykyyn sillä päästään. Syklodilevyt ja kehäpyörä on valmistettu Roland SRM-20 –kaiverruskoneella laserleikatuista aihioista. Ensiöakselin epäkeskot on valmistettu 4 mm paksusta POM:sta laserleikkaamalla. Syklodisen vaihteen kehäpyörän ja rungon osien kohdistukseen on käytetty 3 mm halkaisijaltaan



olevia kohdistustappeja. Toisioakselin laakerin tukemiseen on käytetty alumiinista jyrsittyä päätypalaa.

Akryylisten vaihteen kontaktipinnat voidellaan silikonipohjaisella rasvalla, mikä lisää viskoosikitkaa, mutta parantaa kulutuksenkestävyyttä. Voitelun jälkeen syklodista vaihdetta ei pystytä käsin pyörittämään suoraan toisioakselista, mutta 100 mm varrella vaihde on melko helposti käsin takaisinajettavissa. Pääosin akryylista valmistetun vaihteen ominaisuudet näkyvät kuvassa 17.



Vaihdetyyppi	Syklodinen vaihde
Materiaali	Akryyli (suureksi osaksi)
Koko	Ø110 x 36 mm
Paino	483 g
Välityssuhde	25
Voitelu	Silikonipohjainen rasva

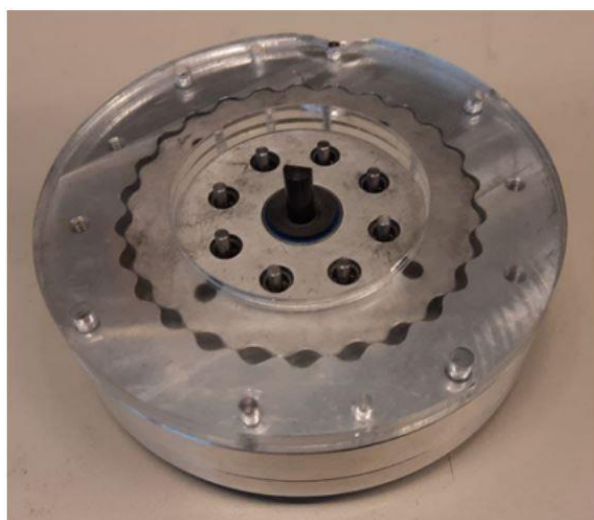
**Kuva 17.** Pääosin akryylista valmistettu syklodinen vaihde. Vaihteen ominaisuudet näkyvät kuvan taulukossa.

#### 5.3.4 Alumiinista valmistettu syklodinen vaihde

Kuvassa 18 näkyy pääosin alumiinista valmistettu syklodinen vaihde. Alumiinin hyvä lämmönjohtokyky on erittäin kaivattava piirre vaihteessa ja alumiini on materiaalina todennäköisesti riittävän kestävä tähän käyttötarkoitukseen. Alumiiniset syklodilevyt ja kehäpyörä on valmistettu Oulun yliopiston pajan CNC-jyrsimellä. Ensiöakselin epäkeskot on valmistettu 4 mm paksusta POM:sta laserleikkaamalla. Syklodisen vaihteen kehäpyörä ja rungon osat on kohdistettu 3 mm halkaisijaltaan olevilla kohdistustapeilla ja toisioakselin laakeri on lukittu alumiinista jyrsityllä päätypalalla.

Alumiinisen vaihteen kontaktipinnat voidellaan AT-1000 yleisrasvalla. Viskoosikitkan vaikutus on huomattavissa voitelun jälkeen ja vaihdetta on raskaampi pyörittää, mutta

vaihdetta pystytään edelleen pyörittämään käsin suoraan toisioakselilta toisin kuin akryylista valmistettua vaihdetta. Alumiinista valmistetun sykloidisen vaihteen ominaisuudet näkyvät kuvassa 18.



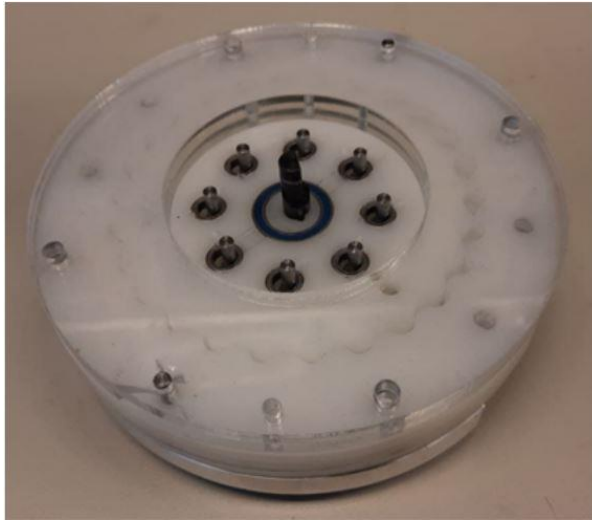
Vaihdetyyppi	Sykloidinen vaihde
Materiaali	Alumiini (suureksi osaksi)
Koko	Ø110 x 36 mm
Paino	635 g
Välityssuhde	25
Voitelu	AT-1000

**Kuva 18.** Pääosin alumiinista valmistettu sykloidinen vaihde. Vaihteen ominaisuudet näkyvät kuvan taulukossa.

### 5.3.5 POM:sta valmistettu sykloidinen vaihde

Sykloidinen vaihde on valmistettu myös pääosin POM:sta ja valmis vaihde näkyy kuvassa 19. POM:n pieni kitkakerroin ja hyvä mekaaninen kestävyys tekevät siitä erittäin lupaavan materiaalin. Sykloidilevyjen ja kehäpyörän valmistukseen on käytetty Roland SRM-20 –kaiverruskonetta. Ensiöakselin epäkeskot on valmistettu 4 mm paksusta POM:sta laserleikkaamalla. 3 mm halkaisijaltaan olevia kohdistustappeja on käytetty kehäpyörän ja rungon osien kohdistukseen. Toisioakselin laakerin tukemiseen on käytetty alumiinista jysittyä päätypalaa.

POM:n tapauksessa voitelu kasvattaa kulumista, muttei juurikaan paranna suorituskykyä, joten POM-vaihde on jätetty alustavasti voitelematta. POM-vaihteen takaisinajettavuus on akryylista ja alumiinista vaihdetta parempi, mutta sen voitelematta jättäminen tarkoittaa sitä, että vaihteesta lähtee käytön aikana melko kova ääni. Myöhemmin POM-vaihde voidellaan testausta varten vielä AT-1000 yleisrasvalla. Kuvassa 19 näkyy POM:sta valmistetun vaihteen ominaisuudet.



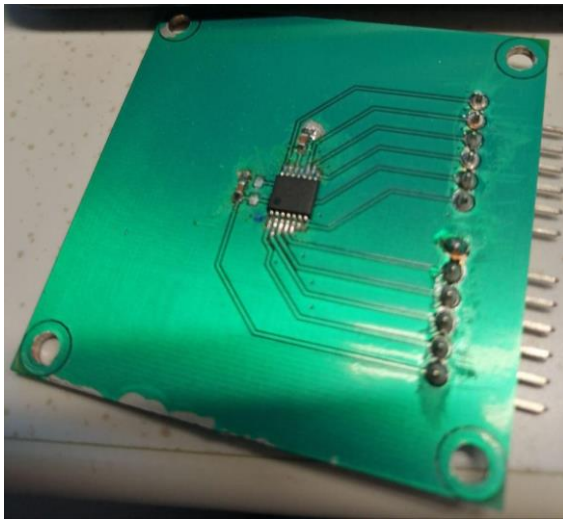
Vaihdetyyppi	Sykloidinen vaihde
Materiaali	POM (suureksi osaksi)
Koko	Ø110 x 36 mm
Paino	497 g
Välityssuhde	25
Voitelu	AT-1000

**Kuva 19.** Pääosin POM:sta valmistettu sykloidinen vaihde. Vaihteen ominaisuudet näkyvät kuvan taulukossa.

## 5.4 Toimilaitteen anturointi

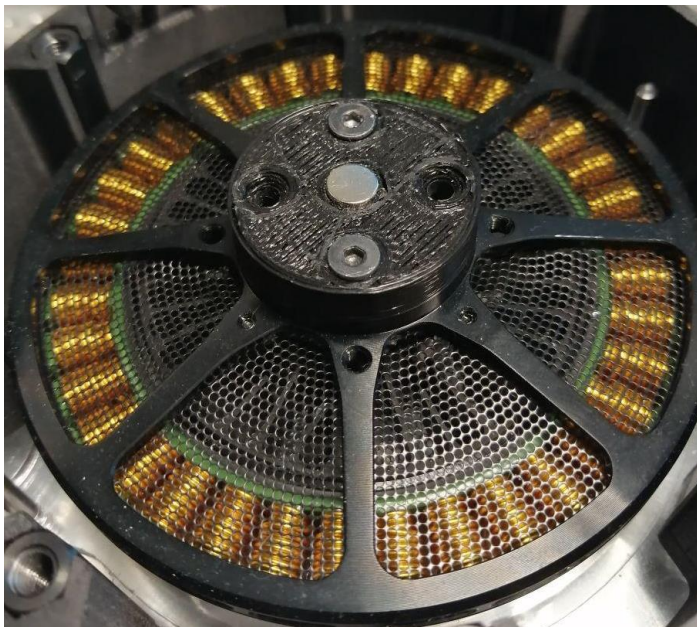
Toimilaitteeseen valitussa U8 Lite-sähkömoottorissa ei ole anturointia valmiina, joten se pitää toteuttaa itse, jotta toimilaitteella voidaan ajaa tarkasti haluttuun asentoon.

Toimilaitteeseen valitaan magneettinen AS5047P-anturi, joka sallii suuren resoluution paikoituksen 28000 rpm asti. Anturi tunnistaa moottorin akselille kiinnitettävän magneetin asennon muutoksen sen magneettikentästä. Anturi sisältää integroidun dynaamisen kulmavirheen kompensoinnin lähes olemattomalla viiveellä. AS5047P-anturi antaa 14-bittistä absoluuttista kulmadataa 4-johtoisen SPI Serial-rajapinnan kautta. Kuvassa 20 näkyy AS5047P-anturi paikallaan piirilevyn pohjassa.



**Kuva 20.** AS5047P-anturi piirilevyn pohjassa.

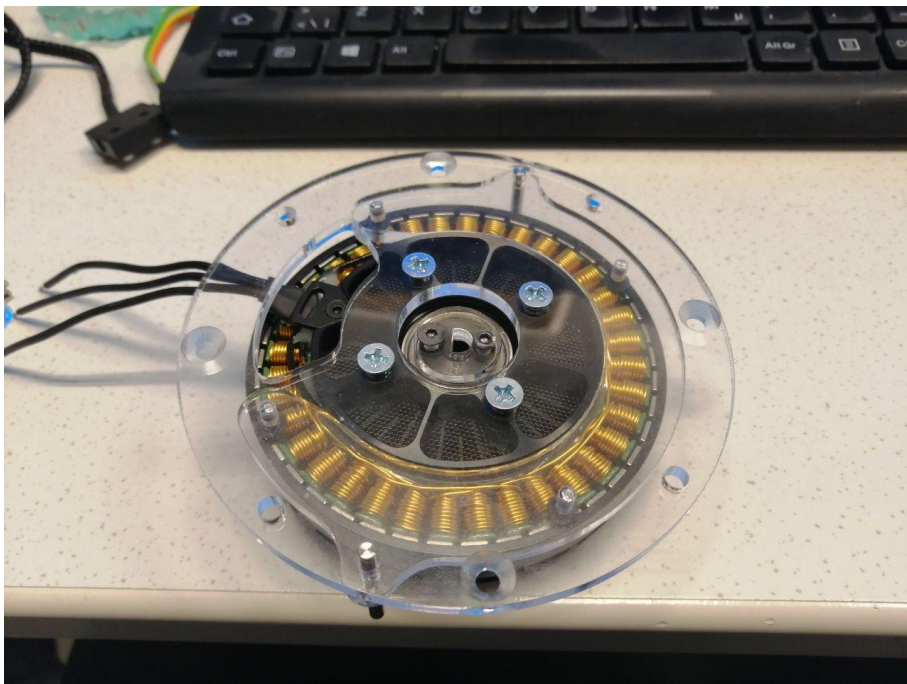
Magneetille tulostetaan 3D-tulostimella PLA:sta sähkömoottorin roottoriin kiinnitettävä alusta (kuva 21). Magneetin alusta on mitoitettu siten, että magneetti pystyy oikealla etäisyydellä (0,5–3 mm) AS5047P-anturista. Magneetin alusta kiinnitetään sähkömoottoriin M3-pulteilla.



**Kuva 21.** Magneetin kiinnitys sähkömoottorin akselille 3D-tulostetun alustan avulla.

## 5.5 Nivelen kotelointi ja kokoonpano

U8 Lite -sähkömoottorin alusta koostuu kiinnitystasosta ja kohdistustasosta. Kohdistustason tarkoituksena on pitää moottori mahdollisimman lähellä kiinnitystason keskipistettä, jotta moottorin alustan kohdistaminen nivelen runkoon kohdistaa samalla sähkömoottorin ja sykloidisen vaihteen pyörimisakselit. Sähkömoottorin pohjan puolelta moottorin akseliin on kiinnitetty D-mallinen akselikytkin, johon sykloidisen vaihteen D-akseli kytketään. D-mallinen akselikytkin on valmistettu aluksi akryylista, mutta lopullinen versio valmistetaan POM:sta. Kuvassa 22 näkyy sähkömoottori kiinnitettynä moottorin alustaan.



**Kuva 22.** U8 Lite -sähkömoottori kiinnitettynä moottorin alustaan.

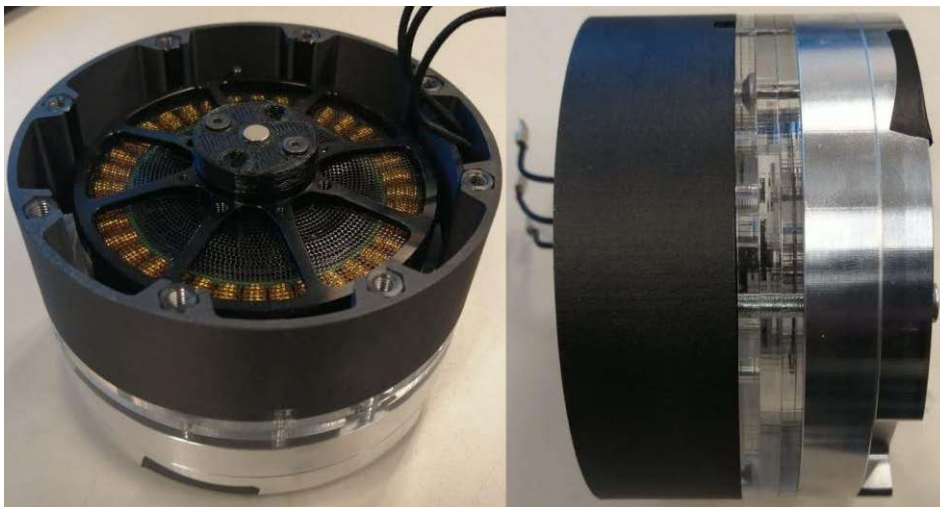
Sähkömoottori asennetaan pohja edellä sykloidista vaihdetta vasten, jotta vaihteen ja moottorin etäisyys saadaan mahdollisimman pieneksi ja akselit saadaan kohdistustapeilla helpommin samaan linjaan. Moottorin alusta kohdistetaan vaihteen runkoon 3 mm halkaisijaltaan olevilla kohdistustapeilla. Kuvassa 23 näkyy U8 Lite -sähkömoottori asennettuna sykloidisen vaihteen perään.





**Kuva 23.** U8 Lite -sähkömoottori asennettuna sykloidiseen vaihteeseen.

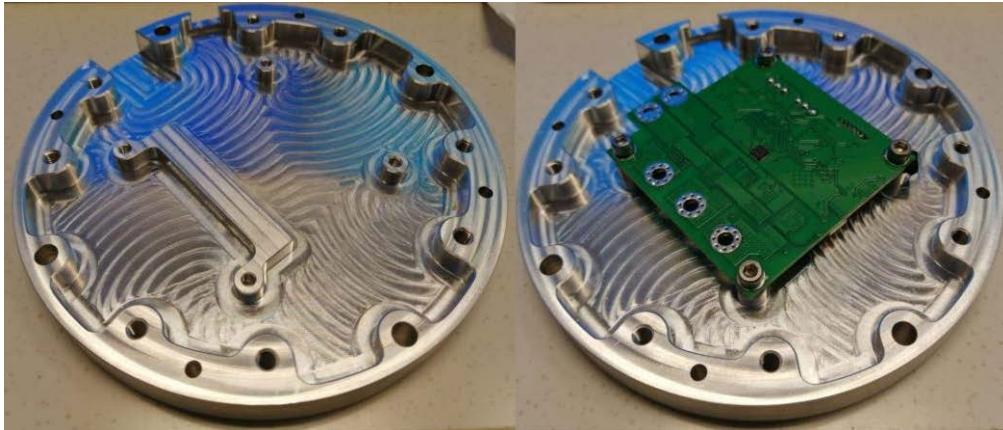
Nivelen kokoonpanon keskeisimpänä osana toimivat kahdeksan M4-kierteillä varustettua sauvaa, joihin nivel kiristetään M4-pulteilla molemmilta puolelta. Näitä sauvoja ympäröi 3D-tulostettu kuori, joka suojaa sähkömoottoria suorilta iskuilta ja pölyltä. Kuvassa 24 näkyy sähkömoottorin kotelointi ja sauvat kotelointiin upotettuna.



**Kuva 24.** Sähkömoottorin kotelointi yläviistosta ja sivulta. Vasemman puoleisessa kuvassa näkyy kotelointiin upotetut sauvat.

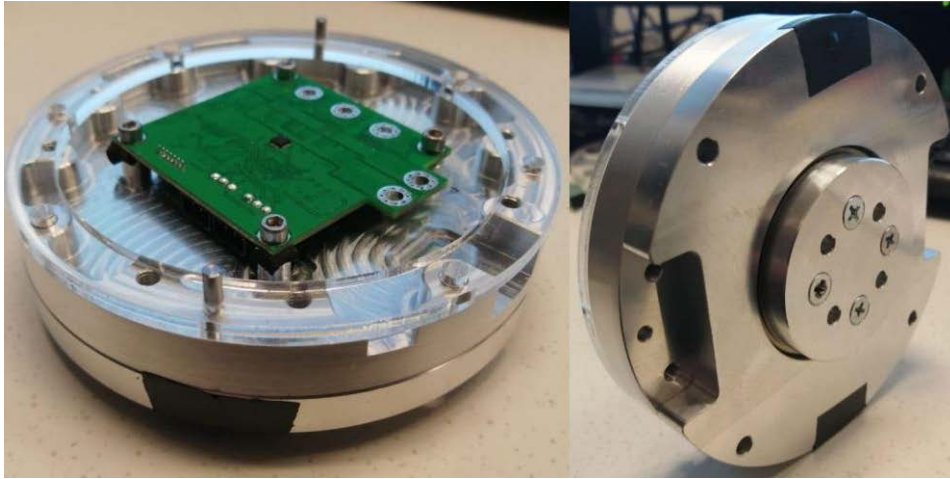
Moottoriohjaimen kanavatransistorit (FET) tuottavat paljon lämpöä käytön aikana, joten niille suunnitellaan jäähdytys. Jäähdytys integroidaan moottoriohjaimen piirilevyn kiinnikkeeseen, joka pitää piirilevyn pohjassa olevan AS5047P-anturin oikealla

etäisyydellä sähkömoottorin akselille asennetusta magneetista. Piirilevyn kiinnike valmistetaan CNC-jyrsimellä yhtenä kappaleena alumiinista, jolloin lämpö johtuu mahdollisimman hyvin kiinnikkeen ulkoreunoille ja nivelen koteloinnin ulkopinnalle. Piirilevyn kiinnike sisältää läpiviennit toimilaitteen virtapiuhuille ja ohjaukseen käytettäville CAN-piuhuille. Kuvassa 25 näkyy valmistettu piirilevyn kiinnike.



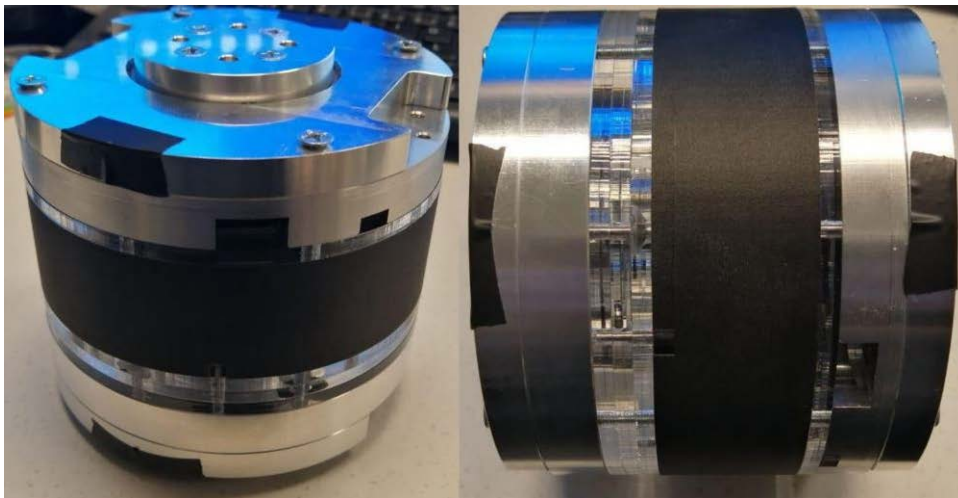
**Kuva 25.** Piirilevyn kiinnike, joka toimii myös moottoriohjaimen lämpösiilinä. Vasemmalla näkyy taso, joita vasten FET:it painautuvat. Vasemmalla ilman piirilevyä ja oikealla piirilevyn kanssa.

Modulaarisen nivelen sykloidisen vaihteen vastakkaiseen päädyn laakeroidaan vapaasti pyörivä akseli, johon nivelen vaihteen toisioakselille kiinnitettävä käsivarsi voidaan lisäksi tukea. Vapaasti pyörivä akseli on lähes identtinen vaihteen päädyssä pyörivään akseliin verrattuna. Vapaasti pyörivän akselin laakeri on lukittu päätypalan ja moottoriohjaimen kiinnikkeen väliin. Kuvassa 26 näkyy moottoriohjaimen kiinnike ja vapaasti pyörivä akseli.



**Kuva 26.** Moottoriohjaimen kiinnike asennettuna vapaasti pyörivän akselin päätypalaan.

Kuvassa 27 näkyy alumiinisella vaihteella varustetun modulaarisen nivelen kokoonpano. Nivel on kiristetty kasaan molemmista päädyistä yhteensä kahdeksalla M4-pultilla. Nivelen vaihde on suhteellisen nopeasti vaihdettavissa ja vaihteen vaihtamiseksi täytyy irroittaa ainoastaan neljä M4-pulttia.

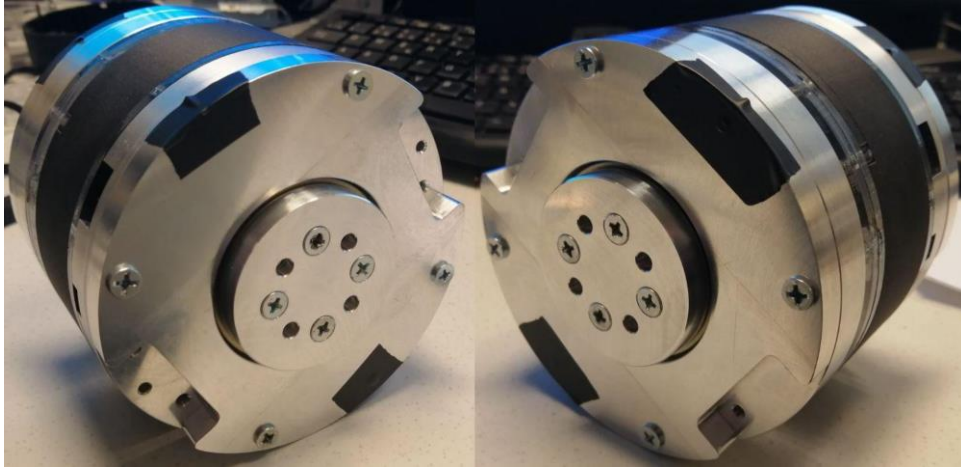


**Kuva 27.** Modulaarisen nivelen kokoonpano.

Vaihteen toisioakselissa ja nivelen vapaasti pyörivässä akselissa on neljä M4-kierteellä varustettua kiinnitysreikää, joihin liikuteltava kuorma voidaan kiinnittää. Kuvassa 28 näkyvät akseleilla olevat tyhjät ulkoisen kuorman kiinnitykseen tarkoitetut reiät. Nivelen molemmissa päädyissä sijaitsee kaksi syvennystä, joissa olevia M4-kierteellä varustettuja

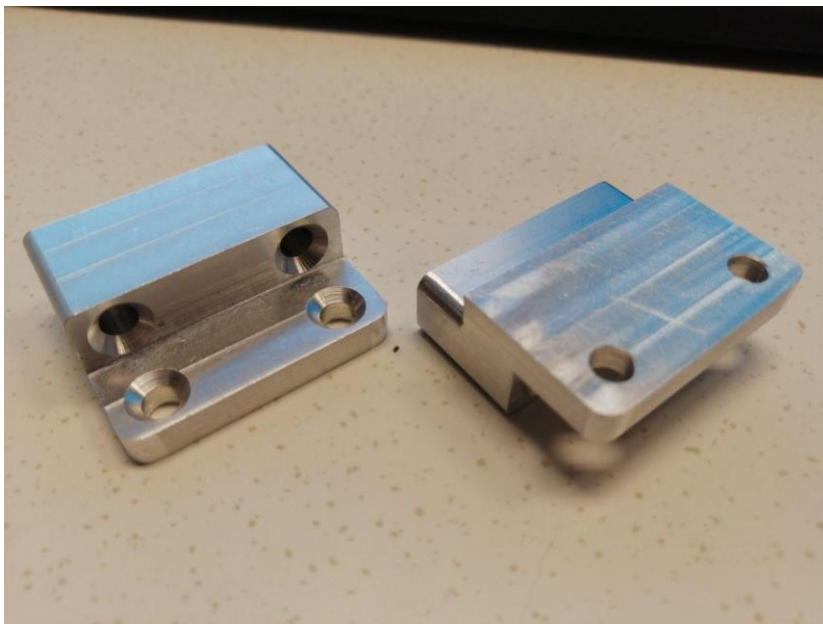


kiinnitysreikiä on tarkoitus käyttää nivelen kiinnityksessä. Kuvassa 28 näkyy nivelen molemmissa päädyissä sijaitsevat syvennykset ja osa kiinnitysreistä.



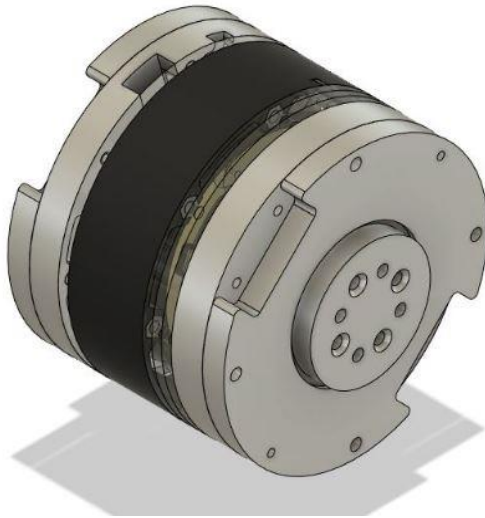
**Kuva 28.** Vasemmalla nivelen vapaasti pyörivä pääty ja oikealla sykloidisen vaihteen puoleinen pääty.

Modulaariselle nivellelle valmistetaan lisäksi kiinnityspalat, joilla kahdesta nivelestä saadaan helposti rakennettua kahden vapausasteen nivelkokonaisuus. Kuvassa 29 näkyy toimilaitteiden väliin valmistetut kiinnityspalat.



**Kuva 29.** Modulaariselle nivellelle valmistetut kiinnityspalat.

Kuvassa 30 näkyy valmiin modulaarisen nivelen 3D-malli ja ominaisuuksia. Modulaarisen nivelen pituus on 101 mm, kun mitataan päätyakseleiden pintojen välinen etäisyys. Päätypintojen välinen etäisyys on 89 mm. Nivelen halkaisija on 110 mm. Nivelen paino riippuu käytettävästä vaihteesta. Akryylisella vaihteella nivelen paino on 1370 g, POM vaihteella 1385 g ja alumiinisella vaihteella 1520 g. U8 Lite – sähkömoottorin 3200 rpm pyörimisnopeudella ja 1,8 Nm vääntömomentilla nivelen laskennallinen maksimi pyörimisnopeus on 128 rpm ja maksimi vääntö on 45 Nm.



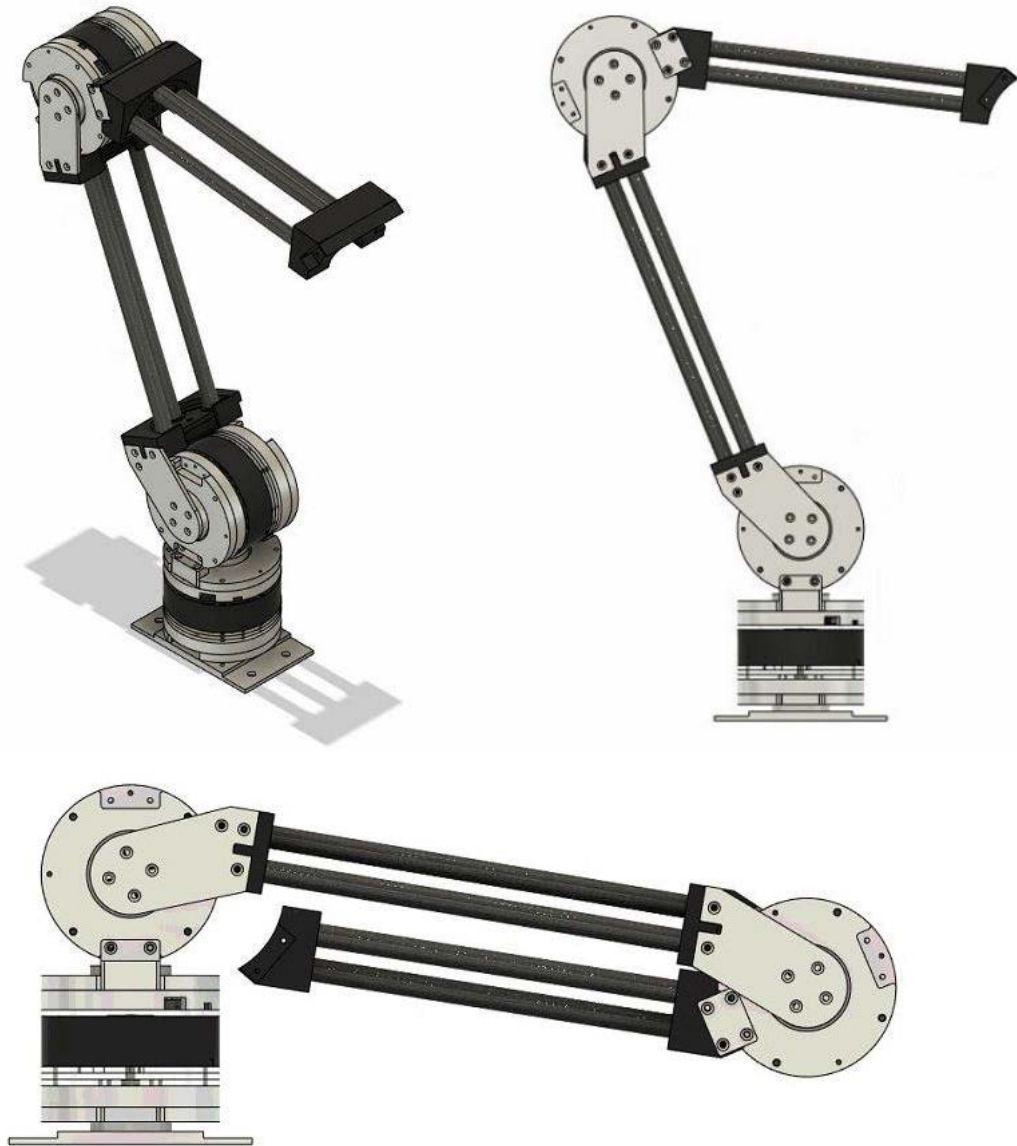
Tuote	Modulaarinen toimilaite
Materiaali	Alumiini, akryyli, PLA, POM
Koko	Ø110 x 101 mm
Paino	1370-1520 g
Välityssuhde	25
Laskettu pyörimisnopeus (48 V)	128 rpm
Laskettu vääntömomentti (@16,5 A, 48 V)	45 Nm

**Kuva 30.** Valmistettu modulaarinen niveli ja sen ominaisuudet.

## 5.6 Nivelistä valmistettava robottikäsi

Kuvassa 31 näkyy esimerkki modulaarisista nivelistä valmistettavalle robottikädelle, jota voitaisiin käyttää tutkimusyksikön mobiilirobotissa. Suunniteltu robottikäsi koostuu kolmesta modulaarisesta nivelestä ja se on suunniteltu taittumaan mahdollisimman pieneen tilaan kuljetuksen ajaksi. Kahden ensimmäisen nivelen yhdistämiseen on käytetty kuvassa 29 näkyviä kiinnityspaloja. Modulaaristen nivelten lisäksi robottikäden rungon

valmistukseen käytetään hiilikuituputkia ja 3D-tulostettuja kiinnityspaloja mahdollisimman kevyen rakenteen aikaansaamiseksi.



**Kuva 31.** Tutkimusyksikön mobiilirobottiin suunniteltu robottikäsi.

## 6 NIVELEN JA VAIHTEIDEN TESTAUS

Modulaarisessa nivelessä käytettävästä syklodisesta vaihteesta on valmistettu kolme eri versiota, joissa kehäpyörän ja syklodilevyjen valmistukseen on käytetty materiaalina akryyliä, alumiinia ja POM:ia.

Nivelen ja eri materiaaleista valmistettujen syklodisten vaihteiden testaukseen käytetään Datum Electronics:n M425 Rotary Torque –vääntömomenttianturia, jolla saadaan samanaikaisesti mitattua akselin pyörimisnopeutta ja vääntömomenttia.

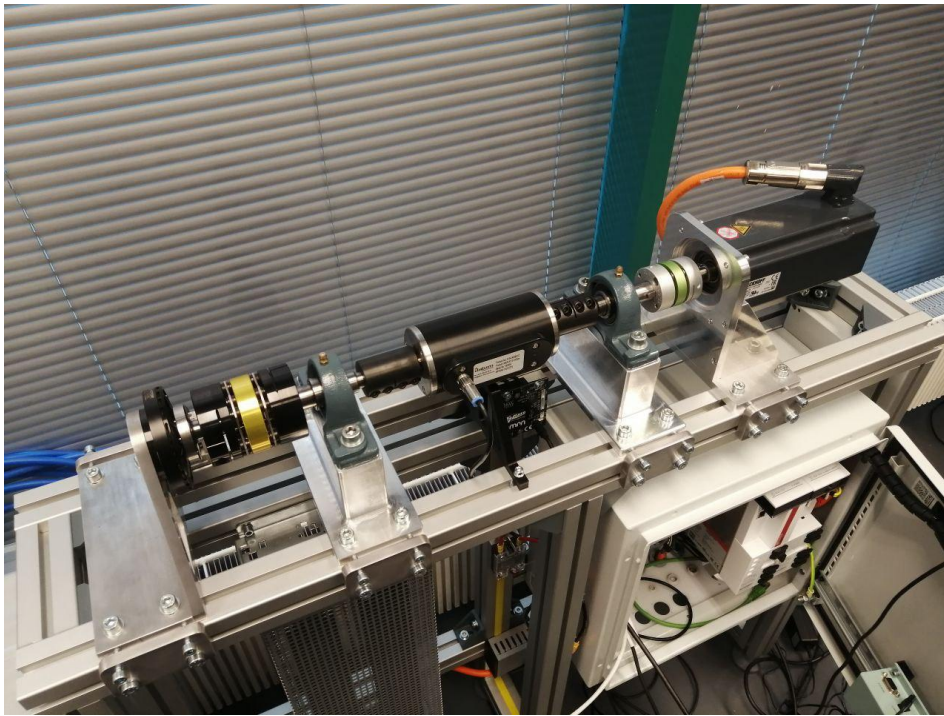
Testaukseen käytetään vääntömomenttianturille rakennettua testipenkkiä, jossa Beckhoffin moottori toimii kuormana testattavalle toimilaitteelle. Testattavaa toimilaitetta ohjataan testipenkissä VESC-moottoriohjaimella, joten modulaariseen niveleen suunniteltua moottoriohjainta ei voida käyttää testissä. Nivelessä käytettävää AS5047P-anturia pystytään kuitenkin käyttämään VESC:n kanssa.

Testissä Beckhoff määrää järjestelmän pyörimisnopeuden ja testattavaa toimilaitetta ohjataan virtaohjauksella, jolloin testin tuloksista saadaan muodostettua toimilaitteen vääntö-virta-kuvaaja. Virtaa nostetaan 0,5 A tai 1 A askelissa ja jokaisesta virta-arvosta mitataan vääntömomenttia kahden sekunnin ajan.

Testeillä pyritään selvittämään vaihteiden hyötysuhteet ja modulaarisen nivelen suorituskyky eri materiaaleista valmistetuilla syklodisilla vaihteilla.

### 6.1 Moottorin testaus

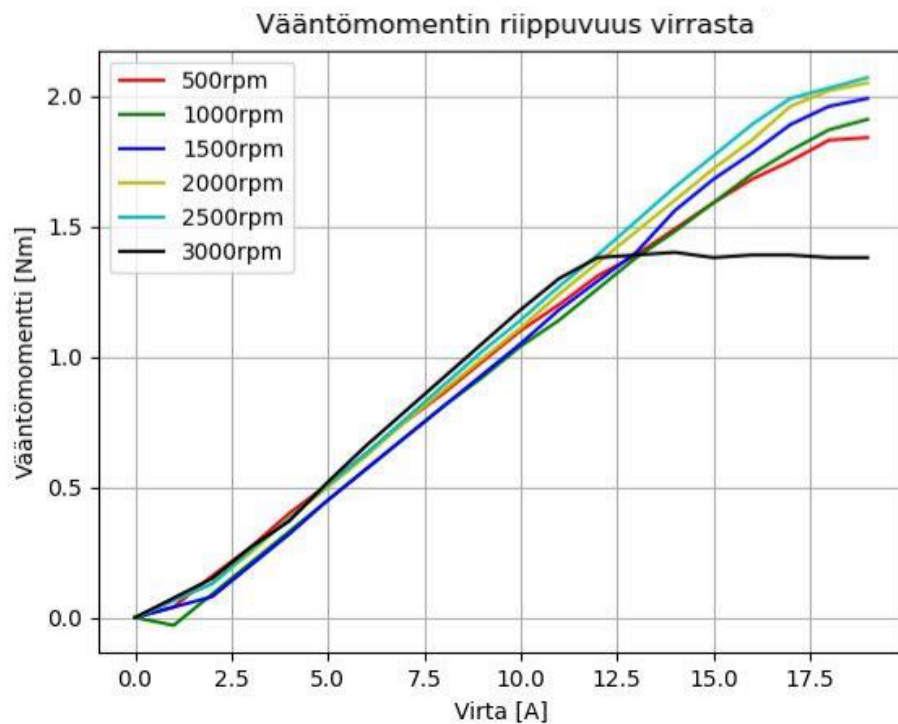
Ensimmäisenä testataan niveleen valittu U8 Lite -sähkömoottori, jotta tiedetään vaihteen ensiöakselille tuleva vääntömomentti. Kuvassa 32 näkyy U8 Lite -sähkömoottori testipenkkiin kiinnitettynä.



**Kuva 32.** U8 Lite –sähkömoottorin testaus dynamometrillä.

U8 Lite -sähkömoottoria testataan 500 rpm välein virta-alueilla 1-19 A ja testeillä halutaan selvittää vaihteiden ensiöakselille tuleva vääntömomentti eri pyörimisnopeuksilla ja virroilla. Tämän lisäksi halutaan tarkistaa kuinka hyvin U8 Lite –sähkömoottorin testattu suorituskyky vastaa valmistajan antamaa suorituskykyä.

Testituloksista on muodostettu kuvassa 33 näkyvä kuvaaja. 2500 rpm pyörimisnopeudella ja 19 A virralla sähkömoottorilla on saavutettu hieman yli 2 Nm vääntömomentti. 3000 rpm pyörimisnopeudella sähkömoottorin suurin mahdollinen vääntömomentti on kuitenkin vain 1,4 Nm. Tulokset vastaavat melko hyvin valmistajan antamia arvoja, joissa U8 Lite -sähkömoottorin vääntömomentti on 16,5 A virralla 1,8 Nm.



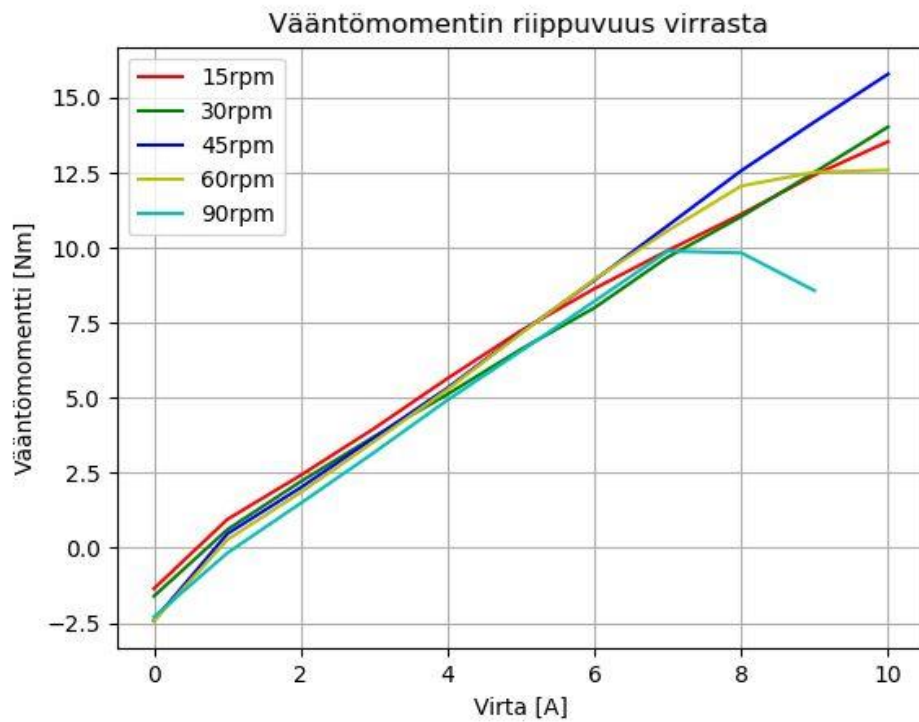
**Kuva 33.** U8 Lite -sähkömoottorin vääntömomentin riippuvuus virrasta eri pyörimisnopeuksilla.

## 6.2 Akryylinen vaihteen testaus

Akryylista valmistetulla sykloidisella vaihteella varustettua niveltä testataan eri pyörimisnopeuksilla ja virtaa kasvatetaan kunnes joko 19 A virta saavutetaan tai toiminta joudutaan muusta syystä keskeyttämään. Testeillä halutaan selvittää akryylinen vaihteen toisioakselille tuleva vääntömomentti suhteessa sähkömoottorille ohjattuun virtaan, kun ensioakselille tuleva vääntömomentti on tiedossa.

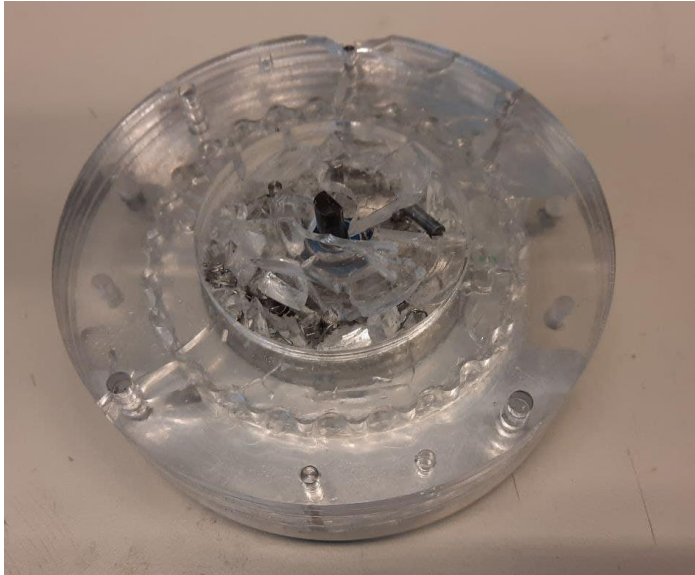
Kuvassa 34 näkyy akryylinen vaihteen testeistä muodostettu kuvaaja. Testit on pysäytetty tavallisesti 10 A kohdalla, kun nivelen värähtely on kasvanut liian suureksi. Poikkeuksena on 90 rpm pyörimisnopeudella suoritettu testi, joka on johtanut akryylinen vaihteen hajoamiseen. Takaisinajoon tarvittava vääntömomentti nähdään kuvaajan alussa, kun Beckhoffin moottori pyörittää vaihdetta ilman VESC:n virtaohjausta. Takaisinajoon tarvittava vääntömomentti on kuvaajista katsottuna noin 2 Nm. Akryylisella vaihteella suurin saavutettu vääntömomentti on noin 16 Nm.





**Kuva 34.** Akryylisella vaihteella varustetun nivelen vääntömomentin riippuvuus virrasta eri pyörimisnopeuksilla.

Akryylinen vaihde on hajonnut 90 rpm pyörimisnopeudella, kun toimilaitteen virta on kasvanut 8 A asti. Kuvassa 35 näkyy akryylinen vaihde hajoamisen jälkeen. Beckhoff on vääntänyt jumiutunutta sykloidista vaihdetta toisioakselilta melko suurella vääntömomentilla ja toisioakselin tapit ovat leikanneet akryylliset sykloidilevyt paloiksi. Yksi toisioakselin tapeista on katkennut myös keskeltä.



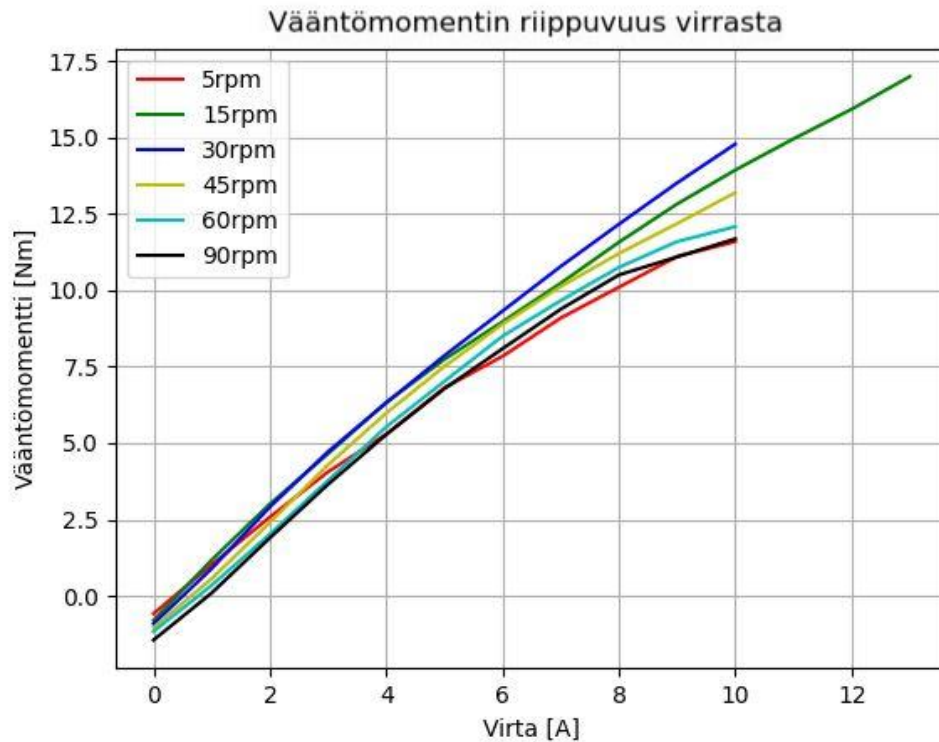
**Kuva 35.** Hajonnut akryylista valmistettu sykloidinen vaihde.

### 6.3 Alumiinisen vaihteen testaus

Alumiinista valmistetulla sykloidisella vaihteella varustettua niveltä testataan eri pyörimisnopeuksilla ja virtaa kasvatetaan kunnes joko 19 A virta saavutetaan tai toiminta joudutaan muusta syystä keskeyttämään. Testeillä halutaan selvittää alumiinisen vaihteen toisioakselille tuleva vääntömomentti suhteessa sähkömoottorille ohjattuun virtaan, kun ensioakselille tuleva vääntömomentti on tiedossa.

Alumiinisen vaihteen testeistä muodostettu kuvaaja näkyy kuvassa 36. Testit on pysäytetty tavallisesti 10 A kohdalla värähtelyn vuoksi, mutta 15 rpm pyörimisnopeudella testi on jouduttu pysäyttämään vasta 13 A kohdalla. Kuvaajien alusta nähdään, että vaihteen takaisinajamiseen tarvitaan noin 1 Nm vääntömomentti. Alumiinisella vaihteella saavutettiin suurimmillaan 17 Nm vääntömomentti.



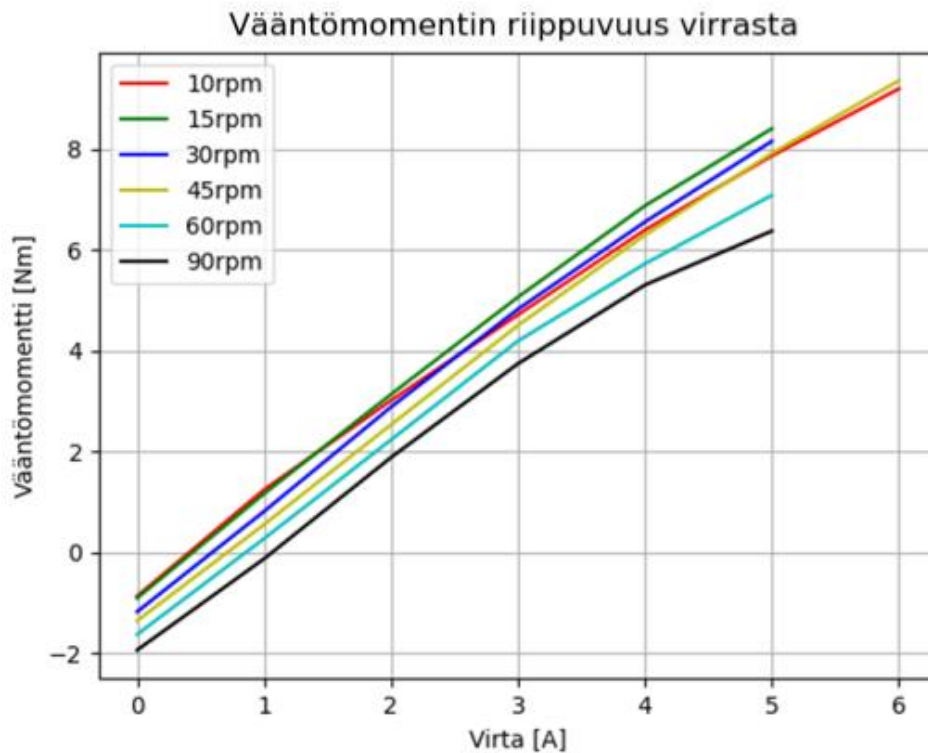


**Kuva 36.** Alumiinisella vaihteella varustetun nivelen vääntömomentin riippuvuus virrasta eri pyörimisnopeuksilla.

## 6.4 POM-vaihteen testaus

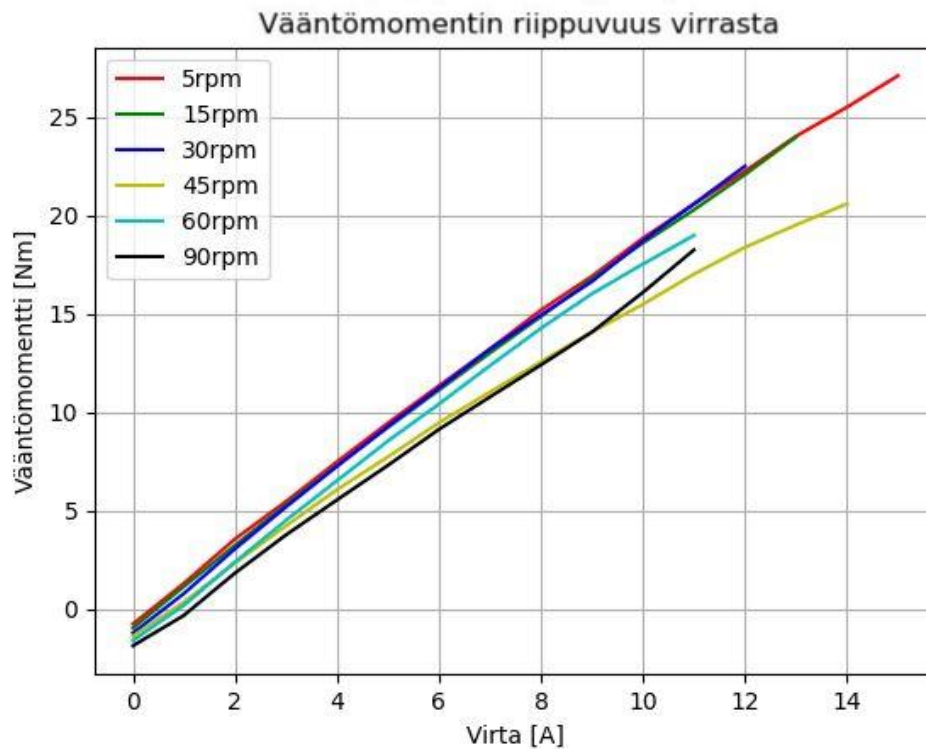
POM:sta valmistetulla sykloidisella vaihteella varustettua niveltä testataan eri pyörimisnopeuksilla ja virtaa kasvatetaan kunnes joko 19 A virta saavutetaan tai toiminta joudutaan muusta syystä keskeyttämään. Testeillä halutaan selvittää alumiinisen vaihteen toisioakselille tuleva vääntömomentti suhteessa sähkömoottorille ohjattuun virtaan, kun ensioakselille tuleva vääntömomentti on tiedossa. POM-vaihteella testit suoritetaan voitelemattomalle vaihteelle ja AT-1000 yleisrasvalla voidellulle vaihteelle.

Kuvassa 37 näkyy voitelemattoman POM-vaihteen testien tuloksista muodostettu kuvaaja. Testit on pysäytetty 5-6 A välillä, kun vaihteen värähtely on kasvanut liian suureksi. Kuvaajien alussa näkyy, että Beckhoffin moottorilta on tarvittu 1-2 Nm toimilaitteen takaisinajamiseen. Voitelemattomalla POM-vaihteella on saavutettu noin 9 Nm vääntömomentti.



**Kuva 37.** Voitelemattomalla POM-vaihteella varustetun nivelen vääntömomentin riippuvuus virrasta eri pyörimisnopeuksilla.

Kuvassa 38 näkyy voidellun POM-vaihteen testeistä muodostettu kuvaaja. Voideltua POM-vaihdetta on pystytty ajamaan voitelematonta vaihdetta suuremmilla virroilla ja testit on keskeytetty tavallisesti vasta 13 A virralla. Keskeyttämisen syynä ei tällä kertaa ollut liian kova värähtely vaan vaihteesta kuuluvan äänen voimistuminen. Takaisinajoon tarvittava vääntömomentti on testatuilla pyörimisnopeuksilla 0,8-1,8 Nm. Voidellulla POM-vaihteella saavutettiin 27 Nm vääntömomentti.

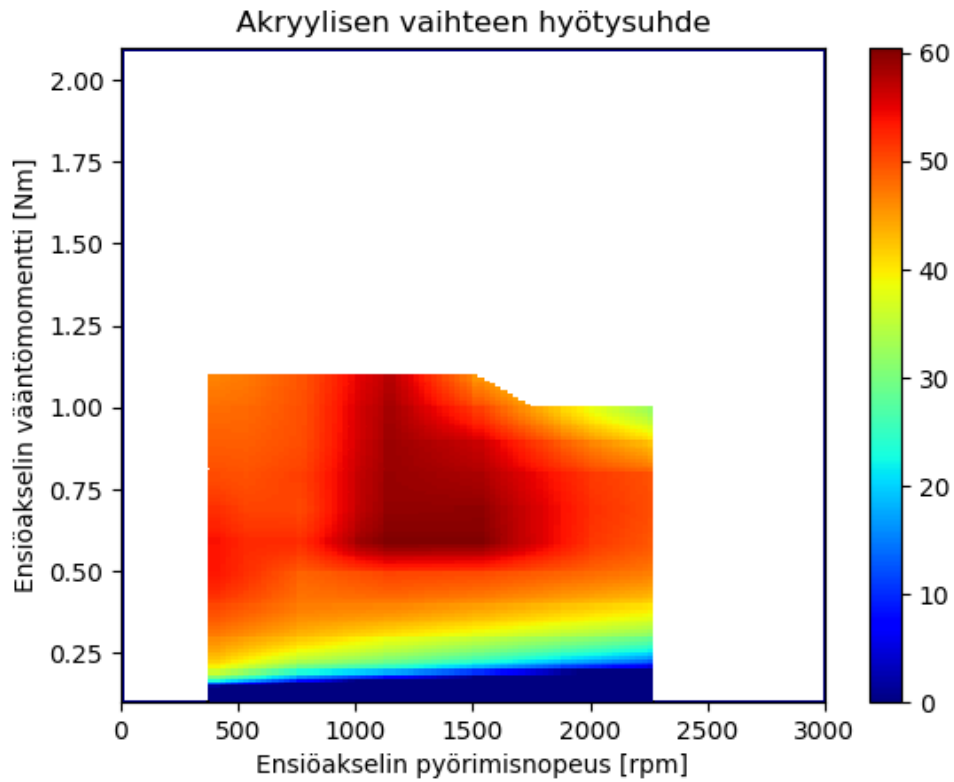


**Kuva 38.** POM-vaihteen voidellulla versiolla varustetun nivelen vääntömomentin riippuvuus virrasta eri pyörimisnopeuksilla.

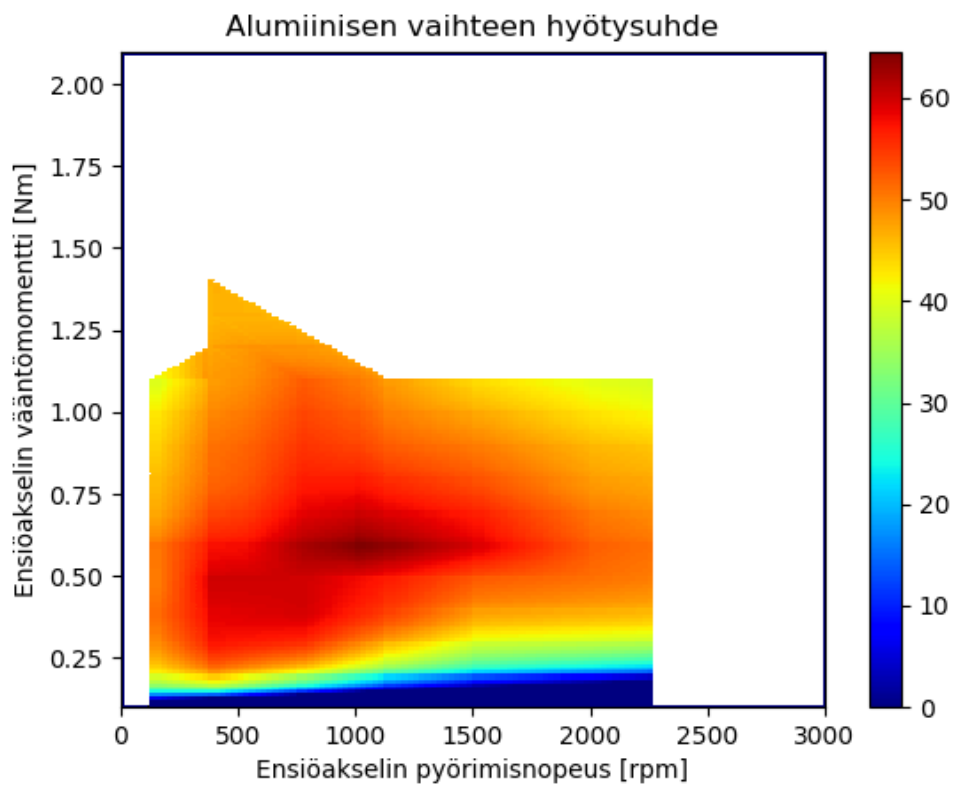
## 6.5 Vaihteiden hyötysuhteet

U8 Lite –sähkömoottorin testeistä on saatu vaihteen ensiöakselille tuleva vääntömomentti suhteessa sähkömoottorille ohjattuun virta-arvoon. Vaihteiden testeistä on saatu vaihteen toisioakselin vääntömomentti suhteessa sähkömoottorille ohjattuun virta-arvoon. Hammasvälitys on pakkoliikkeinen ja välityssuhde säilyy vakiona, joten vaihteen tehohäviöt näkyvät vaihteen vääntömomentissa. Häviöitä aiheuttavat laakereiden kitka ja hammaspintojen liukuminen toisiinsa nähden.

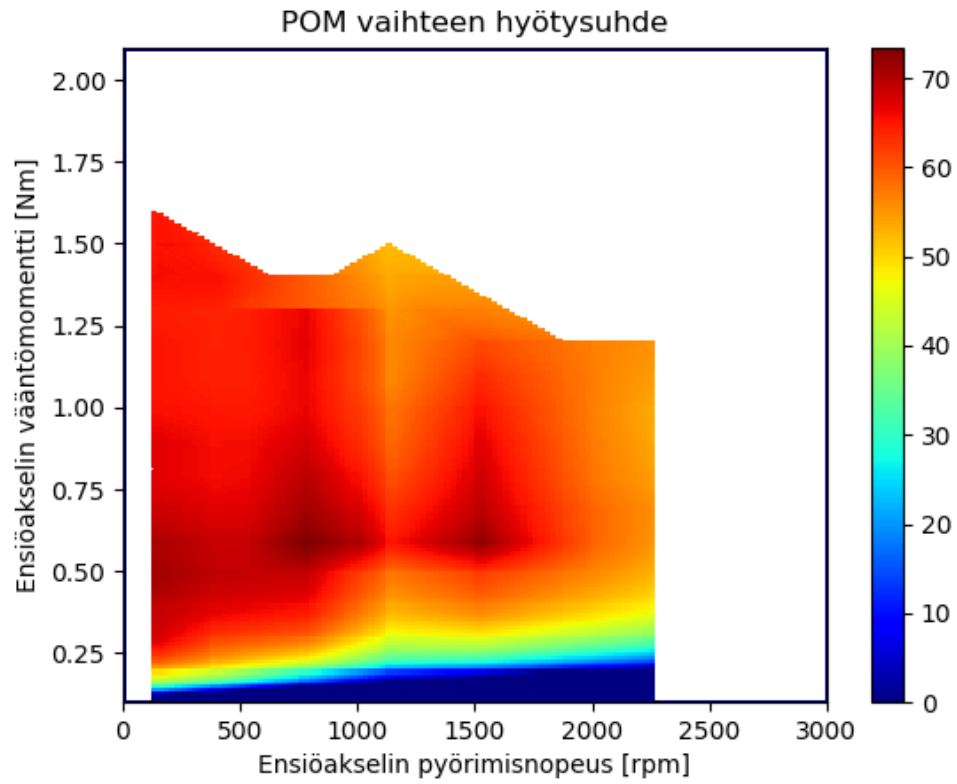
Testituloksista interpoloimalla muodostetaan sykloidisten vaihteiden hyötysuhdekuvaajat ensiöakselin vääntömomentin ja pyörimisnopeuden suhteen. Kuvassa 39 näkyy akryylinen vaihteen hyötysuhde, kuvassa 40 näkyy alumiinisen vaihteen hyötysuhde ja kuvassa 41 näkyy POM-vaihteen hyötysuhde.



**Kuva 39.** Akryylista valmistetun sykloidisen vaihteen hyötysuhde.



**Kuva 40.** Alumiinista valmistetun sykloidisen vaihteen hyötysuhde.



**Kuva 41.** POM:sta valmistetun sykloidisen vaihteen hyötysuhde.

## 7 TULOSTEN TARKASTELU

Toimilaitteen ominaisuudet on testattu kolmella eri materiaalista valmistetulla syklodisella vaihteella ja toimilaitteen testatut ominaisuudet näkyvät taulukossa 9. Yksikään vaihteista ei toiminut U8 Lite -sähkömoottorin koko toiminta-alueella, mutta niillä on päästy melko hyviin 60–73 % hyötysuhteisiin. Suurempikin hyötysuhde on todennäköisesti mahdollinen, jos kehäpyörässä käytettäisiin laakeroituja rullia integroidun muodon sijasta. Integroitu muoto on valittu valmistuksen helpottamiseksi ja koska syklodisten vaihteiden hammaspinnoilla ei teoriassa esiinny muuta kuin vierintää.

**Taulukko 9.** Toimilaitteen testatut ominaisuudet eri materiaalista valmistetuilla syklodisilla vaihteilla.

Tuote	Valmistettu toimilaite		
Vaihteen materiaali	Akryyli	POM	Alumiini
Koko	Ø110 x 101 mm		
Paino	1370 g	1385 g	1520 g
Välityssuhde	25		
Pyörimisnopeus (kuormittamaton)	130 rpm		
Max kuormitettu pyörimisnopeus	90 rpm	90 rpm	90 rpm
Max vääntömomentti	16 Nm	27 Nm	17 Nm
Max ensiöakselin vääntömomentti	1,2 Nm	1,8 Nm	1,2 Nm
Max takaisinajon vääntömomentti	2,5 Nm	1,8 Nm	1,5 Nm
Vääntömomenttitiheys	11,7 Nm/kg	19,5 Nm/kg	11,2 Nm/kg
Max hyötysuhde	60 %	73 %	65 %

Ensiöakselin vääntömomentin kasvattaminen on johtanut syklodisten vaihteiden voimistuvaan värähtelyyn, ja lopulta testin keskeytymiseen. Voidellulla POM-vaihteella värähtely ei kasvanut testien aikana liian suureksi, mutta vaihteesta lähtevä ääni voimistui niin paljon, että vääntömomentin kasvattaminen on jouduttu keskeyttämään. Värähtelyä ja ääntä syntyy hammasvaihteissa tavallisesti, kun hammas tulee ryntöön nopeasti kuormitettuna. Tämän mahdollisia syitä ovat valmistusvirheet ja laitekokonaisuuden vääntövärähtelyt.

Syklodisissa vaihteissa esiintyvän värähtelyn on epäilty myös osittain johtuvan U8 Lite -sähkömoottoria ohjaavasta VESC:stä, mutta VESC:n parametreja säätämällä värähtelyä

ei saatu täysin loppumaan. Värähtelyä esiintyy vain silloin, kun toimilaite ja Beckhoff on kytketty testipenkissä samalle akselille. Käsien kuormitettuna toimilaite vaikuttaa toimivan paremmin ja ilman värähtelyä, mutta näissä tapauksissa kuormittavasta vääntömomentista ei voida olla varmoja.

Eri materiaaleista valmistettujen sykloidisten vaihteiden suurin pyörimisnopeus ja vääntömomentti määräytyvät siten, että sen yläpuolella vaihteen värähtely kasvaa toiminnan kannalta liian suureksi. Poikkeuksena on voideltu POM-vaihde, jossa värähtely on koko testatulla alueella pientä. Voidellun POM-vaihteen tapauksessa testit on keskeytetty, kun vaihteesta lähtevä ääni on kasvanut liian suureksi. Yksikään vaihteista ei päässyt tavoiteltuun 35 Nm vääntömomenttiin, mutta voideltu POM-vaihde pääsi melko lähelle 27 Nm vääntömomentilla.

Kaikki sykloidiset vaihteet ovat suhteellisen pienillä vääntömomenteilla takaisinajettavia, mutta alumiinista valmistettu vaihde on parhaiten takaisinajettava ja akryylista valmistettu vaihde on huonoiten takaisinajettava.

POM-vaihde ja alumiininen vaihde ovat säilyneet testeistä ehjinä, mutta akryylista valmistettu toimilaite on hajonnut 90 rpm pyörimisnopeudella. Akryylisen vaihteen jumiutumisen jälkeen Beckhoffin moottori on vääntänyt vaihteen toisioakselia niin, että toisioakselin tapit ovat hajottaneet sykloidilevyt ja osan laakereista. Yksi toisioakselin tapeista on katkennut myös tämän aikana.

Kestävyyden kannalta POM ja alumiini ovat huomattavasti parempia, sillä jumitilanteessa niistä on hajonnut tavallisesti vain U8 Lite -sähkömoottorin ja vaihteen välinen akselikytkin. Akryylisen vaihteen tapauksessa vaihde on hajonnut jumitilanteessa lähes täysin.

## 8 YHTEENVETO

Tässä työssä pyrittiin valmistamaan modulaarinen toimilaite, jota voitaisiin käyttää Jaco-robottikättä vastaavan robottikäden nivelissä. Toimilaitteeseen sopivia vaihteita ei löytynyt markkinoilta, joten toimilaitteeseen valmistettiin itse sykloidinen vaihde. Sykloidinen vaihde valittiin, koska sen rakenne on mekaanisesti kestävin ja se on mahdollista valmistaa levyistä laserleikkaamalla. Toimilaitteessa käytettävä vaihde valmistettiin 3D-tulostamalla, laserleikkaamalla akryylista ja POM:sta, ja jysimällä akryylista, POM:sta ja alumiinista. Terästä pyrittiin välttämään sen korkean painon vuoksi.

Vaihteen 3D-tulostamisesta luovuttiin ensimmäisen sykloidisen vaihteen prototyypin jälkeen, sillä 3D-tulostetut osat hajosivat helposti. Laserleikkaamalla vaihdetta valmistettiin akryylista ja POM:sta, mutta laakerit eivät pysyneet laserleikatulla pinnalla ahdistusovitteella. Lopulliset kolme sykloidista vaihdetta valmistettiin Roland SRM-20 -kaiverruskoneella akryylista ja POM:sta, ja Oulun yliopiston pajan CNC-jysimellä alumiinista.

Valmistettua toimilaitetta testattiin eri materiaaleista valmistetuilla vaihteilla käyttäen dynamometriä. Toimilaite ei päässyt eri materiaaleista valmistetuilla vaihteilla tavoiteltuun 35 Nm vääntömomenttiin. Tämä johtui valmistettujen vaihteiden suhteellisen alhaisesta 60–73 % hyötysuhteesta ja suurilla ensiöakselin vääntömomenteilla esiintyvistä värähtelystä tai melusta. Värähtelystä ja melusta johtuen vaihteita ei myöskään voitu käyttää koko U8 Lite –sähkömoottorin toiminta-alueella. POM:sta valmistettu vaihde suoriutui muita materiaaleja paremmin kaikissa osa-alueissa paitsi takaisinajoon tarvittavassa vääntömomentissa, jossa alumiininen vaihde on hieman parempi. Takaisinajettavuuden suurin vääntömomentti on sykloidisessa vaihteessa kaikilla eri materiaaleilla melko alhainen 1,5–2,5 Nm.

Akryyli osoittautui sykloidisen vaihteen valmistuksessa sopivaksi materiaaliksi pienemmän vääntömomentin sovelluksiin, joissa ei kuitenkaan haluta käyttää POM:ia sen hinnan vuoksi. POM osoittautui parhaaksi vaihtoehdoksi suuremman vääntömomentin sovelluksiin. POM-vaihteella varustettu toimilaite ei täyttänyt tavoiteltuja suorituskysyvaatimuksia, mutta siitä pystytään kuitenkin valmistamaan hieman pienemmän hyötykuorman käsivarsirobotti.



Valmistetuissa sykloidisissa vaihteissa huono hyötysuhde johtuu kitkasta ja sen yksi suurimmista syistä on todennäköisesti kehäpyörän muotoon integroitujen tappien käyttäminen. Syklodinen vaihde suunniteltiin myös liian ohueksi, jolloin syklodilevyt pääsivät hankautumaan toisiaan vasten vaihteen toiminnan aikana ja tämän hankautumisen kitkavoima laskee myös vaihteen hyötysuhdetta. Lisäksi vaihteen usein lujustechninen mitoitus jäi käytännössä kokonaan tekemättä ja vaihteen komponenttien muodonmuutokset ovat todennäköinen syy vaihteen värähtelyn kasvamiseen ensiöakselin vääntömomentin kasvaessa. Syklodiset vaihteet suunniteltiin käytettäväksi rasvavoitelulla ja POM:in tapauksessa kuivana, mutta POM-vaihteen testaaminen osoitti, että vaihteen voitelulla on suuri vaikutus vaihteen hyötysuhteeseen.

Jatkokehitystä ajatellen vaihteessa on tärkeää mitoittaa sen osat myös lujustechnisesti, jotta akryylisen vaihteen hajoamisen kaltaisilta tilanteilta voidaan välttyä. Syklodisen vaihteen suunnittelussa keskityttiin lisäksi liikaa mahdollisimman ohuen vaihteen valmistukseen, jonka seurauksena syklodilevyissä ei ollut epäkeskojen laakereille kunnollisia laakeripesiä ja syklodilevyt pääsivät hankautumaan toisiinsa liikkeen aikana. Tiiviimpää vaihteen kotelointia ja parempaa voitelua tulisi myös harkita seuraavaan versioon.

## 9 LÄHDELUETTELO

Acutronic Robotics, 2019. Modular joint [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://acutronicrobotics.com/products/modular-joints/> [viitattu 17.10.2019].

Adamiak, M., 2012. Abrasion Resistance of Materials. 1 painos. BoD – Books on Demand, 212 s. ISBN 978-9-5351-0300-4

Aikolon, 2020a. POM – Polyasetaali, POM-C [verkkodokumentti]. Aikolon Oy. Saatavissa: <https://www.aikolon.fi/tuotteet/tekniset-muovit/pom-c> [viitattu 2.3.2021].

Aikolon, 2020b. PMMA – Polymetyylimetakrylaatti, PMMA XT [verkkodokumentti]. Aikolon Oy. Saatavissa: <https://www.aikolon.fi/tuotteet/optiset-muovit/pmma-xt> [viitattu 2.3.2021].

Airila, M. & Käkimäki, M., 1987. Koneenosat. 1 painos. WSOY, 341 s. ISBN 978-9-510-14338-4

Airila, M., 1993. Mekatroniikka. 6 painos. Otatieta, 397 s. ISBN 951-672-274-1

Albu-Schäeffler, A., Haddadin, S., Ott, C. & Stemmer, A., Wimböck, T. & Hirzinger, G., 2007. The DLR Lightweight Robot – Design and Control Concepts for Robots in Human Environments. INDUSTRIAL ROBOT-AN INTERNATIONAL JOURNAL. 34. s. 376-385. 10.1108/01439910710774386.

Anybotics, 2019. Anydrive, Robotic Actuator [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.anybotics.com/anydrive-robotic-actuator/#applications> [viitattu 17.10.2019].

Aubo Robotics, 2019. Modular Robotic Joints [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://aubo-robotics.com/products/modular-robotic-joints/> [18.10.2019].

Bartz, W.J. & Moore, A.J., 1993. Lubrication of Gearing. Wiley, 504 s. ISBN 978-0-852-98831-2

Bolton, W., 1995. *Mechatronics: Electronic Systems in Mechanical Engineering*. Longman, 380 s. ISBN 0-582-25634-8

Datong, Q., 2016. *Power Transmissions: Proceedings of the International Conference on Power Transmissions 2016 (ICPT 2016)*, Chongqing, P.R. China, 27-30 October 2016. CRC Press, 1064 s. ISBN 978-1-315-38681-2

de Silva, C.W., 2015. *Sensors and Actuators: Engineering System Instrumentation*, Second Edition. 2 painos. CRC Press, 847 s. ISBN: 978-1-4665-0682-4

Diequa, 2019a. Spinea – High Precision Cycloidal Reducers: Series M [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://diequa.com/products/cycloidal-reducers/series-m-cycloidal-reducers/> [viitattu 21.7.2019].

Diequa, 2019b. Spinea – High Precision Cycloidal Reducers: Series T [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://diequa.com/products/cycloidal-reducers/series-t-cycloidal-reducers/> [viitattu 21.7.2019].

Farrell, L., Holley, J., Bluethmann, W. & O'Malley, M., 2018. *Cycloidal Geartrain In-Use Efficiency Study*. Teoksessa: ASME 2018 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. Quebec City, Canada, August 26–29, 2018. ASME, 8 s. ISBN: 978-0-7918-5181-4

Gang, A., Guangqiang, Y. & Renjing, L., 2018. *Dynamic model for planetary gear train in a aircraft rotary actuator*. Teoksessa: CSAA/IET International Conference on Aircraft Utility Systems (AUS 2018). Guiyang, China: IET. s. 508-513. ISBN 978-1-78561-792-8

Groover, M.P., 2011. *Introduction to Manufacturing Processes*. Wiley, 720 s. ISBN 978-0-470-63228-4

Hadas, Z. & Garami, B., 2016. *Mechatronic model of harmonic drive system*. Teoksessa: 2016 17th International Conference on Mechatronics - Mechatronika (ME). Prague: IEEE. s1-6. ISBN 978-8-0010-5883-1

Harmonic Drive, 2019a. FB-2 [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.harmonicdrive.net/products/component-sets/pancake/fb-2> [viitattu 20.7.2019].

Harmonic Drive, 2019b. FR-2 [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.harmonicdrive.net/products/component-sets/pancake/fr-2> [viitattu 20.7.2019].

Horvath, J. & Cameron, R., 2020. Mastering 3D Printing: A Guide to Modeling, Printing, and Prototyping. 2 painos. Apress, 347 s.

Hsieh, C.-F., 2015. Traditional versus improved designs for cycloidal speed reducers with a small tooth difference: The effect on dynamics. Mechanism and Machine Theory, 86, s. 15-35.

Jazar, R.N., 2010. Theory of Applied Robotics: Kinematics, Dynamics, and Control (2nd Edition). 2 painos. Springer Science & Business Media, 883 s. ISBN 978-1-441-91756-0

Jetmasters, 2021. Vesileikkaus [verkkodokumentti]. Suomi: Jetmasters. Saatavissa: <https://www.jetmasters.fi/vesileikkaus/> [viitattu 1.3.2021].

Jhang, L., Santiago, C. & Chiu, C., 2017. Multi-sensor based glove control of an industrial mobile robot arm. Teoksessa: 2017 International Automatic Control Conference (CACS). Pingtung: IEEE. s. 1-6. ISBN 978-1-5386-3900-9

Kalouche, S., 2016. Design for 3D Agility and Virtual Compliance Using Proprioceptive Force Control in Dynamic Legged Robots [verkkodokumentti]. Pittsburgh: Carnegie Mellon University. Saatavissa: [https://ri.cmu.edu/pub\\_files/2016/8/kaloucheThesis.pdf](https://ri.cmu.edu/pub_files/2016/8/kaloucheThesis.pdf) [viitattu 21.5.2019]. 110 s.

Kenneally, G., De, A. & Koditschek, D.E., 2016. Design Principles for a Family of Direct-Drive Legged Robots. IEEE Robotics and Automation Letters, 1 (2), s. 900-907.

KHK, 2019. TYPES AND MECHANISMS OF GEAR REDUCERS [verkkodokumentti]. Saatavissa:

[https://khkgears.net/new/gear\\_knowledge/Types\\_and\\_Mechanisms\\_of\\_Gear\\_Reducers.html](https://khkgears.net/new/gear_knowledge/Types_and_Mechanisms_of_Gear_Reducers.html) [viitattu 16.10.2019].

KILT Laser, 2018. Laserleikkaus [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://kilt.fi/laserblogi/laserleikkaus/> [viitattu 1.3.2021].

Kinova, 2018. KINOVA JACO assistive robot [verkkodokumentti]. Saatavissa: [https://www.kinovarobotics.com/sites/default/files/KINO-2018-Bro-Assistive-ZH\\_YUL-06-R-Web.pdf](https://www.kinovarobotics.com/sites/default/files/KINO-2018-Bro-Assistive-ZH_YUL-06-R-Web.pdf) [viitattu 15.7.2019].

Kostic, N., Blagojevic, M., Petrovic, N., Matejic, M. & Marjanovic, N., 2018. Determination of Real Clearances Between Cycloidal Speed Reducer Elements by the Application of Heuristic Optimization. Teoksessa: Transactions of FAMENA. s. 15-26.

Machado, J., Soares, F. & Veiga, G., 2018. Innovation, Engineering and Entrepreneurship. 1 painos. Springer, 1171 s. ISBN 978-3-319-91334-6

Molian, S., 1997. Mechanism Design: The Practical Kinematics and Dynamics of Machinery. 2 painos. Elsevier, 223 s. ISBN 978-0-080-42264-0

Morecki, A. & Knapczyk, J., 2014. Basics of Robotics: Theory and Components of Manipulators and Robots. 1 painos. Springer, 580 s. ISBN 978-3-709-12532-8

Moy, P., Gunnarsson, C.A., Weerasooriya, T. & Chen, W., 2011. Stress-strain response of PMMA as a function of strain-rate and temperature. 2011 SEM Annual Conference on Experimental and Applied Mechanics, Uncasville. s. 125-133.

Mynderse, J. & Shelton, J., 2015. Assessment of an Improved Problem-Based Learning Implementation in a Senior/Graduate Mechatronic Design Course. 2015 ASEE Annual Conference and Exposition, Seattle. s. 1-21.

Qin, Z., Wu, Y.-T., Eizad, A., Lee, K.-H. & Lyu, S.-K., 2019. Design and evaluation of two-stage planetary gearbox for special-purpose industrial machinery. Journal of Mechanical Science and Technology, 33 (12), s. 5943-5950.

Sensingier, J.W., & Lipsey, J.H., 2012. Cycloid vs. harmonic drives for use in high ratio, single stage robotic transmissions. Teoksessa: 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Saint Paul: IEEE. s. 4130-4135.

Servosila, 2019. Servo Drives [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.servosila.com/en/servo-drives/index.shtml> [viitattu 16.10.2019].

Shin, J.-H. & Kwon, S.-W., 2006. On the lobe profile design in a cycloid reducer using instant velocity center. Mechanism and Machine Theory, 41 (5), s. 596-616.

Siciliano, B. & Khatib, O., 2008. Springer Handbook of Robotics. 1 painos. Springer, 1611 s. ISBN 978-3-540-23957-4

Siciliano, B. & Khatib, O., 2016. Springer Handbook of Robotics. 2 painos. Springer, 2227 s. ISBN 978-3-319-32550-7

T-Motor, 2018a. U8 Lite, Parameter [verkkodokumentti]. Saatavissa: [https://uav-en.tmotor.com/html/2018/u\\_0402/21.html](https://uav-en.tmotor.com/html/2018/u_0402/21.html) [viitattu 13.4.2020].

T-Motor, 2018b. U8 II, Parameter [verkkodokumentti]. Saatavissa: [https://uav-en.tmotor.com/html/2018/u\\_0402/22.html](https://uav-en.tmotor.com/html/2018/u_0402/22.html) [viitattu 10.12.2019].

T-Motor, 2018c. U10 II, Parameter [verkkodokumentti]. Saatavissa: [https://uav-en.tmotor.com/html/2018/u\\_1020/20.html](https://uav-en.tmotor.com/html/2018/u_1020/20.html) [viitattu 11.12.2019].

T-Motor, 2018d. U12 II, Parameter [verkkodokumentti]. Saatavissa: [https://uav-en.tmotor.com/html/2018/u\\_1021/174.html](https://uav-en.tmotor.com/html/2018/u_1021/174.html) [viitattu 11.12.2021].

TECS, 2019. Construction of the cycloidal disc of a cycloidal drive [verkkodokumentti]. TECS. Saatavissa: <https://www.tec-science.com/mechanical-power-transmission/planetary-gear/construction-of-the-cycloidal-disc/> [viitattu 6.9.2019].

The World Material, 2020. Aluminum 6061, Al 6061-T6 Alloy Properties, Density, Tensile & Yield Strength, Thermal Conductivity, Modulus Of Elasticity, Welding [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.theworldmaterial.com/al-6061-t6-aluminum-alloy/> [viitattu 11.11.2020].

Valmistajat, 2020a. Alumiini ja alumiiniseokset [verkkodokumentti]. Suomi: Valmistajat. Saatavissa: <https://valmistajat.fi/materiaalit/alumiini-ja-alumiiniseokset> [viitattu 1.3.2020].

Valmistajat, 2020b. Jyrsintä [verkkodokumentti]. Suomi: Valmistajat. Saatavissa: <https://valmistajat.fi/menetelmat/koneistus/jyrsinta/> [viitattu 1.3.2020].

Valmistajat, 2020c. Lastuavat työstömenetelmät [verkkodokumentti]. Suomi: Valmistajat. Saatavissa: <https://valmistajat.fi/menetelmat/lastuavat-tyostomenetelmat/> [viitattu 1.3.2020].

Valmistajat, 2020d. Materiaalia lisäävät valmistusmenetelmät [verkkodokumentti]. Suomi: Valmistajat. Saatavissa: <https://valmistajat.fi/menetelmat/materiaalia-lisaavat-valmistusmenetelmat/> [viitattu 1.3.2020].

Valmistajat, 2020e. Valut ja valaminen [verkkodokumentti]. Suomi: Valmistajat. Saatavissa: <https://valmistajat.fi/menetelmat/valu/valut-ja-valaminen/> [viitattu 1.3.2020].

Velex, P., 2014. International Gear Conference 2014: 26th-28th August 2014, Lyon. Chandos Publishing, 200 s. ISBN 978-1-782-42195-5

Wensing, P.M., Wang, A., Seok, S., Otten, D., Lang, J. & Kim, S., 2017. Proprioceptive Actuator Design in the MIT Cheetah: Impact Mitigation and High-Bandwidth Physical Interaction for Dynamic Legged Robots. IEEE Transactions on Robotics, 33 (3), s. 509-522.

Zackiewicz, A., Trinks, S., Wessolek, G., Wilczek, A., Kafarski, M., Szpylowska, A., Skierucha, W. & Kast, G., 2018. Investigation of Material Properties of POM-C with Regard to its Suitability as a Casing Material for a Time Domain Transmission Profile Probe. 2018 12th International Conference on Electromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances (ISEMA), Lublin. s. 1-3.

